

**UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

**Análise Do Comportamento Higrotérmico De Soluções  
Construtivas De Paredes Em Regime Variável**

Fernando Jorge Fernandes Jorne

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para  
obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil –  
– Perfil Construção

Orientador: Professor Doutor Fernando Henriques

2010



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Henriques, por ter colaborado na escolha e orientação deste trabalho, que representa um tema actual, interessante, mas ainda pouco explorado no que refere ao nosso país. Agradeço o apoio, a partilha do conhecimento e as valiosas contribuições que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Destacar a disponibilidade e atenção que o Professor sempre teve para comigo ao longo desta caminhada.

Em segundo lugar, à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto por ter organizado um workshop sobre o programa WUFI, que explorei nesta dissertação. Este workshop foi uma peça determinante, pois além de me ter dado oportunidade de ouvir ilustres na área da higrotérmica, permitiu-me dissipar algumas dúvidas que tinha até à data.

Em terceiro lugar aos professores da Faculdade de Ciências e Tecnologia, particularmente os que leccionaram as cadeiras de Materiais de Construção, Física das Construções, Tecnologia de Revestimentos, Edificações e Patologia e Reabilitação de Edifícios, pois os conhecimentos que adquiri nestas cadeiras foram fundamentais para a realização desta dissertação. Um especial agradecimento ao Professor Daniel Aelenei, à Professora Paulina Faria e mais uma vez ao Professor Fernando Henriques.

Além dos professores da faculdade, como referi anteriormente foram fundamentais na elaboração desta dissertação, também quero agradecer aos meus colegas pelo apoio, ajuda e bons momentos que me proporcionaram ao longo do curso, em especial à Juliana Mendão, que foi a minha companheira de tantas jornadas ao longo do curso, inclusive nesta dissertação.

Aos meus pais e irmã por razões óbvias. O apoio, a motivação e a ajuda constante foram estímulos fundamentais durante a elaboração da dissertação. Ao meu pai, pela partilha da enorme experiência e conhecimentos importantes que fui adquirindo desde tenra idade na área da construção civil.

Aos restantes familiares e amigos pela amizade e simpatia que esteve sempre presente durante esta etapa.



## Resumo

Num contexto actual, as preocupações dos projectistas aquando da concepção dos edifícios prende-se com a análise do comportamento higrotérmico que os mesmos irão apresentar ao longo do seu tempo de vida útil. O comportamento higrotérmico depende de variados parâmetros, particularmente condições climatéricas e tipo de construção, que normalmente variam de região para região, sendo desta forma quase impossível estabelecer soluções construtivas que tenham um comportamento adequado em qualquer local. Assim, nos últimos tempos tem havido um enorme esforço científico pelo desenvolvimento de modelos higrotérmicos que possam solucionar este problema.

O presente trabalho surge com o objectivo de estudar o comportamento higrotérmico de edifícios em regime variável com recurso ao programa WUFI, que actualmente é um dos programas comerciais de simulação higrotérmica mais utilizados a nível mundial. A partir das análises higrotérmicas obtidas, consegue-se controlar os valores de temperatura e humidade relativa na envolvente e no ambiente interior. Este controlo permite respeitar exigências de salubridade, de qualidade do ar e de durabilidade das construções. Outro parâmetro abordado ao longo das várias simulações higrotérmicas foi o controlo de humidade na construção, uma vez que presentemente existem muitos edifícios com elevada degradação como resultado directo ou indirecto da presença de humidade em excesso. Um controlo apropriado da humidade é também um pré-requisito para a eficiência energética, pois a sua presença num material origina um aumento da sua condutibilidade térmica.

A partir das diversas simulações higrotérmicas realizadas é possível obter várias conclusões, nomeadamente ao nível da escolha do tipo de materiais e o seu respectivo posicionamento. Além disso, com recurso ao WUFI é possível analisar casos de reabilitação e simular o envelhecimento dos materiais, através de uma variação das suas propriedades ao longo do período de análise.

Palavras-chave: WUFI; Modelos higrotérmicos; Simulação higrotérmica; Conforto higrotérmico; Humidade relativa.



## **Abstract**

In these modern times, the main concerns of designers during the conception and design of buildings design are related to the analysis of their hygrothermal behavior which they will provide throughout their life cycle. The hygrothermal behavior depends on various parameters, namely climatic conditions and type of construction, which typically vary from region to region. It is therefore almost impossible to establish constructive solutions that have appropriate behavior at any location. In recent times there has been an enormous effort for the scientific development of hygrothermal models that can solve this problem.

This thesis appears in order to study the hygrothermal behavior of buildings using the WUFI program, which is currently one of the most used commercial software hygrothermal simulation worldwide. From the hygrothermal analysis obtained, it is possible to control the temperature and relative humidity in the building envelope and the inner environment. This control allows to find demands of salubrity, inner air quality and durability of the constructions. Another parameter taken into account throughout the various hygrothermal simulations was the control of humidity inside the building, because there are many buildings with high levels of degradation as a direct or indirect result of the presence of excessive moisture. A proper control of humidity is also a prerequisite for energy efficiency, because its presence inside the material causes an increase in its thermal conductivity.

From the various hygrothermal simulations performed it is possible to obtain several conclusions, particularly in terms of choice of materials and their respective positions on the wall. Moreover, the use of WUFI allows to analyse rehabilitation cases and also the simulation of the aging process of the materials.

Keywords: Hygrothermal models; Hygrothermal simulation; Hygrothermal behavior; Relative humidity.





## Lista de símbolos, Abreviaturas e Nomenclatura

Símbolo	Unidade	Designação
c	J/(kgK)	Capacidade de calor específica
Driving rain load	l/m <sup>2</sup> h	Quantidade da chuva incidente
Rain load	l/m <sup>2</sup> h	Quantidade da chuva vertical
D <sub>w</sub>	m <sup>2</sup> /s	Coefficiente de transferência de água líquida
A	kg/m <sup>2</sup> √s	Coefficiente de absorção
δ	kg/(msPa)	Coefficiente de difusão de vapor de água no ar
δ <sub>p</sub>	kg/( m <sup>2</sup> sPa)	Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água do material
D <sub>ws</sub>	m <sup>2</sup> /s	Coefficiente de transferência de água líquida por sucção
D <sub>ww</sub>	m <sup>2</sup> /s	Coefficiente de transferência de água líquida por redistribuição
α <sub>s</sub>	-	Coefficiente de absorção de radiação solar de onda curta
δ <sub>air</sub>	kg/ [m <sup>2</sup> sPa]	Coefficiente de difusão de vapor de água no ar
α <sub>l</sub>	1/°C	Coefficiente de dilatação linear
β <sub>p</sub>	kg/m <sup>2</sup> sPa	Coefficiente de transferência de vapor de água
L <sub>0</sub>	m	Comprimento inicial de um elemento
h	W/m <sup>2</sup> K	Condutância térmica superficial
h <sub>ext</sub>	W/m <sup>2</sup> K	Condutância térmica superficial exterior
h <sub>conv</sub>	W/m <sup>2</sup> K	Condutância térmica superficial por convecção
h <sub>rad</sub>	W/m <sup>2</sup> K	Condutância térmica superficial por radiação
λ	W/mK	Condutibilidade térmica
g <sub>w</sub>	kg/m <sup>2</sup> s	Densidade do fluxo de humidade
ε	-	Emissividade
H	J/kg	Entalpia
S <sub>d</sub>	m	Espessura da camada de ar de difusão equivalente
μ	-	Factor de resistência à difusão de vapor de água
g <sub>atm</sub>	-	Factor atmosférico do campo de visão
g <sub>terr</sub>	-	Factor terrestre do campo de visão
q	W/m <sup>2</sup>	Fluxo de calor
W <sub>f</sub>	Kg/m <sup>3</sup>	<i>Free saturation</i>
N	-	Índice de nebulosidade
I <sub>t</sub>	Kg/m <sup>2</sup>	Inércia térmica
I	W/m <sup>2</sup>	Intensidade da radiação solar vertical
Na	Kg/m <sup>3</sup>	Humidade absoluta do exterior
Ni	Kg/m <sup>3</sup>	Humidade absoluta do interior
φ	%	Humidade Relativa
m	kg	Massa
ρ <sub>true</sub>	kg/m <sup>3</sup>	Massa específica

$\rho_{\text{bulk}}$	kg/m <sup>3</sup>	Massa volúmica
$p_w$	kg/m <sup>3</sup>	Massa específica do vapor de água
$\varepsilon$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ;	Porosidade
$p_c$	Pa	Pressão capilar dentro dos poros
$p_a$	Pa	Pressão parcial de vapor de água ambiente
$p_s$	Pa	Pressão parcial de vapor de água na superfície
$p_{\text{sat}}$	Pa	Pressão de vapor de saturação
$I_s$	W/m <sup>2</sup>	Radiação normal de onda curta incidente na superfície da envolvente
$I_l$	W/m <sup>2</sup>	Radiação normal de onda longa incidente na superfície da envolvente
$I_e$	W/m <sup>2</sup>	Emissão radiativa de onda longa emitido pela superfície da envolvente
$I_{s,\text{dir}}$	W/m <sup>2</sup>	Radiação solar directa
$I_{s,\text{dif}}$	W/m <sup>2</sup>	Radiação solar difusa
$I_{l,\text{atm}}$	W/m <sup>2</sup>	Radiação atmosférica de onda longa
$I_{l,\text{terr}}$	W/m <sup>2</sup>	Radiação terrestre de onda longa
$I_{l,\text{refl}}$	W/m <sup>2</sup>	Radiação atmosférica de onda longa reflectida pelo solo
$R_{\text{si}}$	m <sup>2</sup> K/W	Resistência térmica superficial interior
$R_{\text{se}}$	m <sup>2</sup> K/W	Resistência térmica superficial exterior
$T_e$	°C	Temperatura do ambiente exterior
$T_{\text{se}}$	°C	Temperatura superficial exterior
$T_{\text{si}}$	°C	Temperatura superficial interior
$w_t$	Kg/m <sup>2</sup>	Total teor de água
$w$	Kg/m <sup>3</sup>	Teor de água
$W_{\text{máx}}$	Kg/m <sup>3</sup>	Teor de humidade máximo
$\Delta L$	m	Variação de comprimento
$\Delta T$	°C	Variação de temperatura
vel. vento	m/s	Velocidade vento

# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
1.1. Motivação e enquadramento do tema	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Plano de Trabalho	3
<b>2. DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES HIGROTÉRMICAS REALIZADAS PELO PROGRAMA</b>	5
2.1. Cargas higrotérmicas	5
2.2. Condições externas e internas	6
2.3. Modelo de simulação higrotérmica	7
2.4. Dados de Input e Output	9
2.5. Pressupostos e simplificações do modelo higrotérmico	11
2.6. Limitações do modelo higrotérmico	12
2.7. Interpretação e avaliação de resultados (pós-processamento)	12
2.8. Falhas ou limitações do WUFI	13
2.8.1. Inércia térmica	13
2.8.2. Sombreamento	13
<b>3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS PELO PROGRAMA PARA O CÁLCULO DAS SIMULAÇÕES HIGROTÉRMICAS</b>	15
3.1. Introdução	15
3.2. Propriedades básicas	15
3.2.1. Massa volúmica	15
3.2.2. Porosidade	15
3.2.3. Calor específico	16
3.2.4. Condutibilidade térmica de um material seco	16
3.2.5. Factor de resistência à difusão de vapor de água para um material seco	16
3.3. Propriedades adicionais	17
3.3.1. Curva de armazenamento de humidade	17
3.3.1.1. Intervalos da curva de armazenamento de humidade	17
3.3.1.2. Construção da curva de armazenamento de humidade	20
3.3.2. Coeficiente de transferência de água líquida	21
3.3.3. Comparação entre o transporte de água líquida, difusão de vapor de água e condutibilidade térmica	23

3.3.4. Condutibilidade térmica em função do teor de humidade .....	23
3.3.5. Factor de resistência à difusão de vapor de água em função da humidade .....	24
3.3.6. Difusão de vapor de água .....	25
3.3.7. Camada de caixa-de-ar .....	27
3.3.8. Adsorção, desadsorção e absorção .....	27
<b>4. FUNCIONAMENTO GERAL DO PROGRAMA .....</b>	<b>29</b>
4.1. Introdução.....	29
4.2. Elemento Construtivo .....	29
4.2.1. Elemento construtivo e Posições de monitorização .....	29
4.2.2. Orientação, Inclinação e Altura .....	30
4.2.3. Coeficientes de transferência de superfície .....	31
4.2.3.1. Superfície exterior .....	31
4.2.3.1.1. Resistência térmica superficial .....	31
4.2.3.1.2. Espessura da camada de ar de difusão equivalente .....	34
4.2.3.1.3. Absorção de radiação por onda-curta .....	35
4.2.3.1.4. Emissividade.....	37
4.2.3.1.5. Factor de redução da chuva incidente .....	37
4.2.3.2. Superfície interior .....	37
4.2.3.2.1. Resistência térmica superficial .....	37
4.2.3.2.2. Espessura da camada de ar de difusão equivalente .....	38
4.2.4. Condições Iniciais.....	38
4.3. Controle .....	39
4.3.1. Período de Simulação/ Profiles.....	39
4.3.2. Numérico .....	39
4.4. Clima .....	40
4.4.1. Clima exterior .....	40
4.4.2. Clima Interior .....	40
4.4.2.1. Introdução .....	40
4.4.2.2. Curvas Sinusoidais .....	41
4.4.2.3. Norma EN 13788.....	42
4.4.2.4. Norma EN15026.....	42

4.5. Outputs .....	43
4.5.1. Introdução .....	43
4.5.2. <i>Quick Graph</i> – Temperatura da superfície/ Temperatura de ponto de orvalho .....	43
4.5.3. <i>Quick Graph</i> – Monitor Positions Isopleths .....	44
4.5.4. <i>Quick Graph</i> – Teor de água total e teor de água de materiais individuais .....	44
4.5.5. Status of Last calculation .....	44
4.5.6. WUFI-Filme .....	45
<b>5. FICHEIRO CLIMÁTICO DE LISBOA .....</b>	<b>47</b>
5.1. Introdução .....	47
5.2. Temperatura exterior .....	47
5.3. Humidade relativa exterior .....	47
5.4. Radiação global .....	48
5.5. Chuva incidente .....	50
<b>6. ANÁLISE DOS PARAMENTOS INTERIOR E EXTERIOR .....</b>	<b>53</b>
6.1. Introdução .....	53
6.2. Comportamento higrotérmico do paramento interior da parede exterior face às condições de fronteira e solução construtiva .....	53
6.2.1. Introdução .....	53
6.2.2. Comparação entre o método Glaser e o método seguido pelo WUFI .....	53
6.2.3. Condensações internas na parede exterior .....	55
6.2.3.1. Introdução .....	55
6.2.3.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica .....	55
6.2.3.3. Análise de Resultados da evolução da Humidade Relativa ao longo da secção transversal da parede exterior .....	55
6.2.4. Condensações superficiais e proliferação de fungos no paramento interno .....	58
6.2.4.1. Introdução .....	58
6.2.4.2. Avaliação pela versão unidimensional .....	60
6.2.4.3. Avaliação pela versão bidimensional .....	63
6.3. Comportamento do paramento exterior da parede exterior face às condições de fronteira e solução construtiva .....	68
6.3.1. Introdução .....	68
6.3.2. Acção da Temperatura .....	68
6.3.2.1. Colocação diferencial de isolante térmico na envolvente exterior .....	68
6.3.2.1.1. Introdução .....	68

6.3.2.1.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica.....	69
6.3.2.1.3. Avaliação da ocorrência de Termoforese nas diferentes soluções construtivas .....	69
6.3.2.2. Paramento exterior da parede exterior com diferentes cores e orientações geográficas.....	70
6.3.2.2.1. Análise dos parâmetros que influenciam a variabilidade dimensional ..	70
6.3.2.2.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica.....	73
6.3.2.2.3. Análise dos resultados obtidos para o valor da temperatura .....	74
6.3.2.2.4. Análise da influência dos resultados obtidos na variabilidade dimensional .....	74
6.3.3. Acção da humidade .....	75
6.3.3.1. Introdução.....	75
6.3.3.2. Humidificação devido a condensações superficiais .....	76
6.3.3.2.1. Fenómeno de condensações superficiais no sistema ETICS.....	76
6.3.3.2.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica.....	76
6.3.3.2.3. Modelação do overcooling no WUFI.....	77
6.3.3.2.4. Resultados Obtidos e respectivas análises.....	82
6.3.3.3. Humidificação na superfície exterior devido à chuva incidente sobre a fachada .....	87
6.3.3.3.1. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica.....	87
6.3.3.3.2. Resultados obtidos e respectivas análises.....	87
6.3.3.4. Discussão dos resultados obtidos para a humidificação na superfície externa .....	88
<b>7. ANÁLISE DA QUANTIDADE DE HUMIDADE NOS PANOS DE ALVENARIA PARA DIFERENTES SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E MATERIAIS COM DIFERENTES PROPRIEDADES .....</b>	<b>91</b>
7.1. Introdução.....	91
7.2. Protecção à chuva incidente em soluções construtivas com revestimento externo à base de argamassas de ligantes minerais .....	91
7.2.1. Introdução.....	91
7.2.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica.....	94
7.2.3. Resultados obtidos e respectivas análises.....	94
7.2.3.1. Revestimentos externos com diferentes valores de coeficientes A e Sd ...	94
7.2.3.2. Influência de um aumento anual do coeficiente de absorção do revestimento externo.....	97

7.2.3.3. Avaliação de soluções com vista à redução do teor de água na parede.....	99
7.2.3.3.1. Fase de concepção para construção de um edifício novo.....	99
7.2.3.3.2. Fase de concepção para a reabilitação de um edifício.....	102
7.2.3.3.3. Análise de modelação computacional no WUFI para a aplicação do hidrófugo .....	103
7.3. Colocação do isolante térmico e aplicação de hidrófugo na envolvente exterior no comportamento higrotérmico de paredes expostas à chuva incidente.....	104
7.3.1. Introdução:.....	104
7.3.2. Comportamento higrotérmico da parede mediante o posicionamento do isolante térmico.....	106
7.3.2.1. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica.....	106
7.3.2.2. Resultados da evolução do teor de água no pano de alvenaria.....	106
7.3.2.2.1. Solução com isolamento pelo exterior .....	106
7.3.2.2.2. Solução com isolamento pelo interior .....	109
7.3.3. Solução de reabilitação com a aplicação dum produto hidrófugo na envolvente exterior e colocação de isolante térmico pelo interior.....	111
7.3.3.1. Introdução.....	111
7.3.3.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica.....	112
7.3.3.3. Resultados e análise da evolução do teor de água no pano de alvenaria.	113
<b>8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>115</b>
8.1. Principais conclusões .....	115
8.2. Desenvolvimentos futuros .....	121
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>129</b>
Anexo A.....	131
Valores de propriedades de materiais utilizados pelo WUFI .....	131
Anexo B.....	137
Tabelas de <i>Inputs</i> introduzidos no WUFI para as simulações higrotérmicas.....	137
Anexo C.....	147
Resultados obtidos nas simulações higrotérmicas.....	147





## Índice de Figuras

fig. 1- Representação esquemática das cargas higrotérmicos e das suas alterações direccionais diurnas e sazonais que actuam numa parede externa para ASHRAE [1] .....	6
fig. 2 - Fluxograma sobre o processamento / organização do modelo de simulação higrotérmica [11].....	9
fig. 3 – Etapas da fixação de água por <i>adsorção</i> ao nível de um poro[49] .....	17
fig. 4- <i>Curva de armazenamento de humidade</i> , relação entre o teor de água [ $\text{kg/m}^3$ ] e HR [%].....	18
fig. 5 – Três intervalos da <i>Curva de armazenamento de humidade</i> : <i>intervalo higroscópico</i> , <i>intervalo capilar</i> e intervalo acima do limite de saturação [50] .....	19
fig. 6 - Passagem da zona higroscópica para a zona de água capilar na <i>curva de armazenamento de humidade</i> .....	20
fig. 7- <i>Transporte de água capilar</i> de um bloco de betão celular autoclavado determinado por medições variáveis de absorção e redistribuição de água[44]. .....	23
fig. 8 – Fenómenos de difusão de vapor, <i>difusão de superfície</i> e condução capilar [42] .	25
fig. 9 – Relação entre a <i>condutância térmica superficial</i> e a velocidade do vento [7] .....	32
fig. 10 - Variação da radiação solar incidente e o tempo [7] .....	36
fig. 11 - Posição do clima interior no Wufi.....	41
fig. 12 – Temperatura exterior diária do ano de referência para a zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI) .....	47
fig. 13 – HR exterior diária do ano de referência para a zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI) .....	48
fig. 14 - Radiação Solar Global anual para a orientação Sul na zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI) .....	49
fig. 15 - Radiação Solar Global anual para a orientação Este na zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI) .....	49
fig. 16 - Radiação Solar Global anual para a orientação Norte na zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI) .....	50
fig. 17 – Radiação global horária média para os meses de Verão e Inverno [7].....	50
fig. 18 – Chuva incidente [ $\text{l/m}^2\text{h}$ ] ao longo do ano de referência, para as variadas orientações geográficas (valores retirados do ficheiro climático de Lisboa).....	51
fig. 19 - Diagrama da chuva incidente para o ficheiro climático de Lisboa [Programa WUFI] .....	51

fig. 20 - Influência de determinados parâmetros na proliferação de bolores no paramento interno de uma parede [64] .....	59
fig. 21 – Análise da temperatura e humidade relativa, tendo em conta o desenvolvimento de fungos nos paramentos interiores das paredes exteriores [33] .....	60
fig. 22 – Avaliação da existência de risco de proliferação de fungos para Temperatura de ambiente interno igual a 20°C e humidades relativas: 60%, 70% e 80%.....	61
fig. 23 - Avaliação da existência de risco de proliferação de fungos para as soluções construtivas: Parede simples (1); Parede <i>sandwich</i> (2); Parede dupla sem Isolamento Térmico (3); Parede dupla (4) .....	63
fig. 24 - Deposição diferencial de poeiras em suspensão num paramento interior de uma parede exterior [20] .....	64
fig. 25 - Manchas de bolor acentuadas junto à ligação parede exterior/ tecto numa instalação sanitária [18].....	64
fig. 26 - Soluções construtivas: Parede <i>sandwich</i> e Parede com isolamento térmico pelo interior .....	65
fig. 27 - Temperatura superficial, HR e risco de proliferação de fungos no paramento interior da parede exterior, para a solução de Parede <i>sandwich</i> (tijolo cerâmico a vermelho, junta de argamassa a azul e zona estrutural a preto) .....	66
fig. 28 - Temperatura superficial, HR e risco de proliferação de fungos no paramento interior da parede exterior (zona corrente a vermelho, zona estrutural a preto), para a solução de Parede com isolamento térmico pelo interior.....	67
fig. 29 – Fenómeno de termoforese numa fachada com revestimentos à base de ligantes minerais [19] .....	68
fig. 30 - Solução construtiva: parede <i>sandwich</i> sem correcção térmica, parede <i>sandwich</i> com correcção térmica e parede ETICS .....	69
fig. 31 – Temperatura e HR no paramento exterior da parede exterior (solução ETICS), para as zonas: zona corrente e zona estrutural .....	70
fig. 32 - Condutâncias térmicas superficiais exteriores na envolvente Sul, Este e Norte, respectivamente.....	73
fig. 33- Colonização biológica numa fachada orientada a Norte .....	77
fig. 34- Componentes da radiação que entram para o cálculo do “ <i>Balanço radiativo explícito</i> ” [64].....	78
Figura 35 - Teor de água na camada de revestimento externo, para diferentes orientações geográficas .....	88

fig. 36 – Análise da Humidificação em superfícies com diferentes orientações geográficas [3] .....	89
fig. 37 - Definição da curva de separação de elementos com bom e mau desempenho na protecção à chuva incidente [45].....	93
fig. 38 - Teor de água na camada de betão celular autoclavado para um conjunto de valores de A e Sd para o revestimento externo .....	95
fig.39 – Teor de água ao longo da secção transversal, para o caso de $A=1\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$ e $S_d=0,4\text{m}$ .....	96
fig. 40 - Avaliação da alteração do Coeficiente de Absorção (A) no teor de água da alvenaria [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ao longo do período de simulação.....	98
fig. 41 - Soluções construtivas alternativas para obter redução do teor de água no pano de alvenaria e paramento interno da parede.....	101
fig. 42 - Análise do risco de ocorrência de proliferação de fungos no paramento interno da parede exterior .....	101
fig. 43 – Evolução do teor de água numa parede com duas fases: sem e com hidro-repelente na superfície do revestimento externo .....	102
fig. 44 – Recuo da frente húmida devido à aplicação do hidrófugo de superfície originando criptoflorescências [27].....	104
fig. 45- Evolução do teor de água no pano simples de alvenaria cerâmica para diferentes sistemas de isolamento térmico.....	107
fig. 46 - <i>Profile</i> do teor de água de uma parede de pano simples com isolamento térmico pelo exterior (lã mineral).....	108
fig. 47 – Temperatura num ponto a meio da camada de alvenaria, para diferentes soluções construtivas .....	110
fig. 48 – Teor de água na camada de tijolo ao longo do período de simulação, para diferentes soluções construtivas.....	111
fig. 49 – Teor de água total em toda a solução construtiva ao longo do período de simulação, para soluções com materiais iguais, mas colocados em espaços temporais diferentes .....	114

## ANEXO A

fig. 1 - Média diária da temperatura e humidade interna em edifícios de habitação e escritórios dependendo da média diária da temperatura exterior [12].....	135
fig. 2 – Exemplo de diagrama psicrométrico .....	135
fig. 3 – Gráfico de avaliação de risco de proliferação de fungos (Curva LIM B I a tracejado e curva LIM B II a traço contínuo).....	136

## ANEXO C

fig 1 - Caso inicial / Isolamento térmico exterior / Isolamento térmico entre panos de alvenaria / Isolamento térmico interior.....	149
fig 2 - Caso inicial / Barreira pára-vapor interior / Barreira pára-vapor exterior / Barreira pára-vapor entre panos de alvenaria .....	149
fig 3 - Caso Inicial / Solução de reabilitação / Caixa-de-ar entre panos de alvenaria .....	150
fig 4 - Caso Inicial / Temperatura interior igual a 10°C / Carga de humidade absoluta interna elevada.....	150
fig 5 - Avaliação da existência de risco de proliferação de fungos para Temperatura de ambiente interno igual a 15°C e humidades relativas: 60%, 70% e 80%.....	151
fig 6 - Avaliação da existência de risco de proliferação de fungos para Temperatura de ambiente interno igual a 10°C e humidades relativas: 60%, 70% e 80%.....	151
fig 7 - Temperatura superficial exterior na zona corrente (parede <i>sandwich</i> ) e zona estrutural (b.a.) com forra cerâmica.....	152
fig 8 - Temperatura no paramento exterior da parede exterior para a zona corrente e zona estrutural sem forra cerâmica .....	152
fig 9 - <i>Profile</i> do teor de água de uma parede de pano simples com isolamento térmico pelo exterior (EPS) .....	154

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Fenómenos presentes na elaboração das equações de transferência de calor e umidade da norma EN15026 .....	8
Tabela 2 - Relação entre Temperatura de orvalho e HR e entre HR e risco de ocorrência de condensações .....	43
Tabela 3 – Coeficientes de transmissão térmica das soluções construtivas analisadas .....	62
Tabela 4 – Dimensões das camadas e materiais das soluções construtivas analisadas .....	65
Tabela 5 - Coeficientes de absorção de radiação de onda-curta para os 3 tipos de simulações estudadas .....	71
Tabela 6 – Valores médios e máximos de intensidade de radiação solar (I) para as diferentes orientações geográficas, obtidos pelo WUFI .....	72
Tabela 7 - Influência das propriedades do reboco exterior no número de horas em que ocorrem condensações superficiais na superfície exterior .....	83
Tabela 8 - Influência das propriedades das características da fachada no número de horas em que ocorrem condensações superficiais na superfície exterior .....	84
Tabela 9 - Influência do clima exterior no número de horas em que ocorrem condensações superficiais na superfície exterior .....	86
Tabela 10 - Influência do clima interior no número de horas em que ocorrem condensações superficiais na superfície exterior .....	87
Tabela 11 - Causas que dão origem à ocorrência de fissuração [27] .....	97
Tabela 12 - Valores máximos do teor de água para a situação do aumento anual de 25% do coeficiente de absorção .....	99
Tabela 13 - Diferenças médias do teor de água entre isolantes com diferente material e/ou espessura .....	109
Tabela 14 – Diferentes ordens cronológicas na aplicação da solução de reabilitação .....	113

## ANEXO A

Tabela 1 - Valores do factor b [%/M, -%].....	133
Tabela 2 - Valores do factor de resistência à difusão de vapor de água ( $\mu$ ) para alguns materiais usados no WUFI .....	133
Tabela 3 - Valores do coeficiente R1 .....	133
Tabela 4 - Valores do coeficiente R2 .....	134
Tabela 5 - Coeficiente de absorção de radiação por onda curta (as) [64] .....	134
Tabela 6 - Valores de Teor de água inicial do material em kg/m <sup>3</sup> [66] .....	134

## ANEXO B

Anexo B - Tabela 1 - - <i>Inputs</i> introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos: 6.3.2.2.....	139
Anexo B - Tabela 2 - <i>Inputs</i> introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos: 6.2.3.....	140
Anexo B - Tabela 3 - <i>Inputs</i> introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos: 6.2.4.2.....	141
Anexo B - Tabela 4- <i>Inputs</i> introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos: 6.2.4.3 e 6.3.2.1 .....	142
Anexo B - Tabela 5 - <i>Inputs</i> introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos: 6.3.3.2 / 6.3.3.3 .....	143
Anexo B - Tabela 6 - <i>Inputs</i> introduzidos no WUFI para as simulações analisadas no capítulo: 7.2.2 .....	144
Anexo B - Tabela 7 - <i>Inputs</i> introduzidos no WUFI para as simulações analisadas no capítulo: 7.3.1 .....	145
Anexo B - Tabela 8 - <i>Inputs</i> introduzidos no WUFI para as simulações analisadas no capítulo: 7.3.3 .....	146

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação e enquadramento do tema

A humidade relativa interior dos edifícios é um parâmetro essencial para avaliação do conforto higrotérmico, razão pela qual é necessário definir exigências para os seus valores. Por conforto higrotérmico entende-se a sensação de bem-estar associada a uma determinada temperatura e humidade relativa do ar ambiente.

A humidade na construção é uma das anomalias mais comuns nos edifícios e é responsável pelo desconforto dos utilizadores e pela degradação acentuada dos elementos construtivos, destacando-se o desenvolvimento de fungos [36]. Esta é a anomalia que mais facilmente indica se a humidade relativa do ar interior é demasiado elevada [49]. A relação entre a humidade relativa interior e o desenvolvimento de fungos permite identificar exigências de salubridade, de qualidade do ar e de durabilidade das construções, relativamente às quais o desempenho dos edifícios será afectado caso estas exigências não sejam cumpridas. A variação de humidade relativa do ar interior é influenciada por um grande número de factores, salientando-se: a pressão de vapor exterior, a temperatura interior, a ventilação e a produção de vapor de água. A existência de materiais higroscópicos<sup>1</sup> em contacto com o ar interior pode também ser relevante para a definição dessa variação [30].

Actualmente existem muitos edifícios com elevada degradação, como resultado directo ou indirecto da presença de humidade em excesso e de uma forma não controlada. Assim, o controlo de humidade tornou-se uma questão determinante na construção de edifícios. As degradações referidas, têm vindo a ter uma maior magnitude, porque nos últimos tempos as funcionalidades dos edifícios e as práticas de construção têm vindo a sofrer grandes alterações. Em países industrializados tem havido a necessidade de poupar energia, promovendo a construção de edifícios com melhor isolamento térmico e com maior estanquidade [44]. Esta última exigência é consequência de uma redução drástica do caudal de ventilação natural através de aberturas não intencionais, a chamada ventilação natural não controlada [30].

A obtenção de um melhor conforto higrotérmico fez aumentar o número de aparelhos de climatização instalados (arrefecimento e aquecimento), bem como de sistemas de controlo de humidade relativa, através do uso de dispositivos de desumidificação [44]. Contudo, se a

---

<sup>1</sup> Materiais que têm a propriedade de absorver a humidade do ar, para Humidade Relativa inferior a 100% (limite de saturação).

envolvente exterior dos edifícios não for projectada para lidar com determinados gradientes de temperatura e pressão de vapor de água, o aparecimento de condensações ou desenvolvimento de fungos podem acontecer.

O facto de o aumento da humidade presente no material originar um aumento da condutibilidade térmica<sup>2</sup>, faz com que o controlo de humidade apropriado seja um pré-requisito para a eficiência energética. É demonstrado em [25], o quão importante é controlar a humidade nos materiais da envolvente exterior de forma a reduzir o consumo de energia, na fase de exploração dos edifícios. Além disso, o controlo de humidade permite evitar a existência de anomalias nas envolventes, aspecto que também deve ser tido em conta, na criação de medidas de reabilitação para os edifícios já existentes.

Um bom controlo de humidade depende de variados parâmetros, particularmente condições climáticas e tipo de construção, que normalmente variam de região para região. Desta forma, é quase impossível estabelecer regras gerais que possam ser aplicadas para todos os locais e todo tipo de construção. Esta é a razão de nos últimos tempos, ter havido um enorme esforço científico pelo desenvolvimento de modelos higrotérmicos que possam ajudar a precaver variações de temperatura e humidade nas envolventes dos edifícios, como é o caso das paredes e coberturas [44]. Os fundamentos do controlo de humidade e da aplicação de modelos para análises de problemas higrotérmicos referentes a edifícios habitacionais e patrimoniais são descritos ao longo desta dissertação.

## **1.2. Objectivos**

O objectivo da presente dissertação é estudar o comportamento higrotérmico de edifícios em regime variável com recurso ao programa WUFI, que actualmente é um dos programas comerciais de análise higrotérmica mais utilizados a nível mundial [15]. De salientar que os cálculos e resultados obtidos apenas são referentes a paredes exteriores, apesar de ao longo desta dissertação referir-se várias vezes o comportamento higrotérmico do edifício em geral.

Actualmente existem modelos de cálculo de simulação de transferência de calor e transporte de humidade nas envolventes de construção [vd.2.3], que fornecem resultados confiáveis. No entanto, a utilização destes modelos é muito dificultada devido à complexidade, a qual exige muita experiência e conhecimento por parte do utilizador [46]. Por essa razão, ainda não é prática comum resolver problemas de física das construções

---

<sup>2</sup> Quantidade de calor que atravessa, perpendicularmente, uma superfície de área unitária na unidade de tempo, quando existe uma diferença de temperatura de uma unidade entre essa superfície e outra igual, situada a uma distância unitária, sendo uma característica que varia com o material e com a temperatura [30].



relacionados com o transporte de humidade, para além do cálculo de difusão de vapor de água, como ocorre com o método de Glaser<sup>3</sup> [12]. Deste modo, é objectivo da presente dissertação obter o cálculo da transferência de calor e humidade nas várias camadas da secção transversal da envolvente de construção, em regime variável. Para tal, será usada a versão unidimensional e bidimensional do programa WUFI. Consoante a situação, usar-se-á a versão mais adequada para o estudo da simulação higrotérmica. Sucintamente as situações que serão analisadas são:

- Secagem da humidade inicial de construção;
- Acumulação de humidade por condensações internas devido à difusão de vapor;
- Condensações superficiais no paramento interno da parede exterior;
- Condensação superficial exterior devido ao arrefecimento da superfície pela troca de radiação de onda longa com o ambiente circundante;
- Penetração de humidade devido à exposição à chuva incidente e coeficiente de absorção dos materiais;
- Anomalias resultantes do excesso de humidade e de heterogeneidades térmicas no paramento exterior e paramento interior da parede exterior;
- Perdas de calor relacionadas com a transferência e evaporação<sup>4</sup> de humidade.

Quando são adoptados materiais e sistemas construtivos desadequados em soluções de reabilitação, estas podem traduzir-se em situações ainda mais nefastas para a envolvente externa. Assim, será também objectivo desta dissertação, o estudo dos processos de transferência de calor e humidade, que permitem avaliar a resposta de um edifício face às solicitações climáticas e escolher as soluções construtivas que garantam um desempenho higrotérmico adequado à sua localização [44].

### **1.3. Plano de Trabalho**

Com vista a facilitar a compreensão dos resultados obtidos na elaboração da dissertação são apresentados nos primeiros cinco capítulos a teoria relacionada com a temática do comportamento higrotérmico dos edifícios, bem como o funcionamento do programa

---

<sup>3</sup> Também conhecido como método de ponto de orvalho

<sup>4</sup> A evaporação de humidade de uma superfície provoca o seu arrefecimento.

utilizado para a realização das simulações higrotérmicas. Nos capítulos seguintes são analisados e comentados os resultados obtidos nestas simulações.

Deste modo, a presente dissertação divide-se em 8 capítulos de acordo com a descrição que se apresenta de seguida:

- No capítulo 1 são feitas considerações iniciais acerca do tema em estudo e apresentados os objectivos do trabalho.

- No capítulo 2 é feita uma descrição dos parâmetros necessários para a realização de uma simulação higrotérmica pelo programa WUFI.

- No capítulo 3 são descritas as propriedades que são necessárias para as simulações e a forma como interagem no processo de cálculo.

- No capítulo 4 será explicado o funcionamento geral do programa, isto é, serão analisados todos os menus do WUFI necessários para a realização das simulações higrotérmicas, bem como as diferentes formas de obter os resultados.

- No capítulo 5 será analisado o valor das grandezas de referência (p.e., temperatura) ao longo do ano, que constam no ficheiro climático.

- No capítulo 6 é feita uma análise da forma como as superfícies dos paramentos interior e exterior podem condicionar o desempenho higrotérmico dos edifícios, tanto no que toca aos fenómenos que envolvem o ambiente exterior, como aos que resultam da interacção com o ambiente interior.

- No capítulo 7 serão estudadas várias soluções construtivas, tendo em vista a procura de soluções que garantam uma protecção eficaz à chuva incidente, resultando desta forma em menores valores de teor de água no pano de alvenaria. Serão analisados casos de reabilitação e casos onde se alteram as propriedades dos materiais ao longo do período de simulação, para simular o seu envelhecimento.

- Por fim, no capítulo 8, apresentam-se as principais conclusões resultantes deste estudo e perspectiva-se o desenvolvimento de trabalhos futuros nesta mesma área.

## 2. DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES HIGROTÉRMICAS REALIZADAS PELO PROGRAMA

### 2.1. Cargas higrotérmicas

A principal função da envolvente dos edifícios é a protecção dos espaços interiores das condições adversas do ambiente exterior, que se traduzem em cargas higrotérmicas, nomeadamente: radiação solar, chuva incidente, humidade ascensional proveniente do solo, trocas de calor e de vapor de água entre a superfície da parede e o ambiente [vd.fig. 1]. Geralmente, o valor que estas apresentam na superfície exterior tem variações diárias consideráveis, das quais apenas uma menor parte se propaga para a superfície interior da parede.

A radiação solar (composta por radiação de onda curta e onda longa) durante o dia provoca o aquecimento da superfície exterior da envolvente, sendo responsável pela evaporação da humidade da camada superficial. Por outro lado, quando a radiação de onda curta cessa, a emissão de onda longa pode conduzir a *overcooling*<sup>56</sup>, podendo originar condensações superficiais ao nível da superfície exterior [vd.6.3.3.2]. No entanto, o maior teor de humidade é encontrado normalmente quando a parede está exposta à chuva incidente [vd.6.3.3.3]. Em geral, estas cargas higrotérmicas e outras já referidas anteriormente perfazem vários ciclos de cargas higrotérmicas sobrepostos, como os casos: Verão / Inverno, dia / noite e chuva / sol. Portanto, uma análise precisa às cargas higrotérmicas deve ser realizada antes de começar a construir a envolvente de um edifício [44].

---

<sup>5</sup> Os termos em inglês que aparecem ao longo da presente dissertação são designações utilizadas pelo programa, não havendo uma tradução adequada para estas, estas aparecem em *epígrafa*.

<sup>6</sup> Fenómeno que ocorre normalmente durante o período nocturno, quando a temperatura da superfície exterior é menor que a temperatura do ambiente exterior [3].

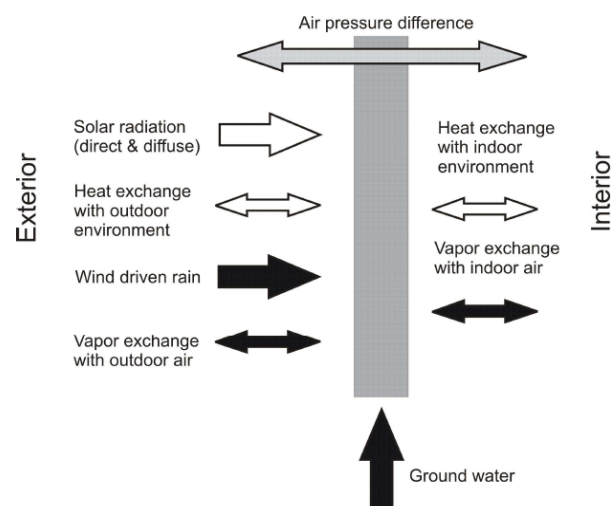


fig. 1- Representação esquemática das cargas higrotérmicas e das suas alterações direccionais diurnas e sazonais que actuam numa parede externa para ASHRAE [1]

## 2.2. Condições externas e internas

A temperatura, teor de água e pressão parcial de vapor de água são as condições de fronteira que influenciam os dois lados duma parede exterior.

No que se refere às condições do clima exterior, estas revelam alguns padrões repetitivos (radiação solar apenas durante o dia, a quantidade da chuva muito superior nos meses da estação de aquecimento, entre outros) cujos impactos sobre a construção podem ser avaliados através da selecção representativa de dados meteorológicos fornecidos para o local específico do edifício.

As condições do ambiente interior dependem do tipo de ocupação do edifício, sendo controladas para manter o espaço interior confortável e com condições de salubridade para os seus ocupantes [44]. Para a envolvente da construção, as condições interiores representam uma carga higrotérmica importante, podendo ser ainda mais grave do que as cargas provenientes do exterior, especialmente quando a produção de humidade interior é alta [62]. Em edificios residenciais, as condições interiores são influenciadas pelo comportamento dos ocupantes. Em média, numa família de quatro pessoas, são evaporados aproximadamente dez litros de água por dia [44]. Esta humidade deve ser removida pela ventilação natural ou mecânica, a fim de garantir um conforto higrotérmico, pois humidade relativa alta pode dar origem a formação de bolores e fungos nas superfícies das paredes [46]. Posteriormente estes aspectos serão analisados nas simulações higrotérmicas [vd.6.2.4].

### 2.3. Modelo de simulação higrotérmica

Ao nível da Engenharia Civil e Arquitectura, bem como para efeitos de preservação do património, tem havido uma crescente evolução dos métodos de cálculo para avaliar e prever a longo prazo o desempenho higrotérmico da envolvente da construção [44]. A tarefa de controlar a temperatura e humidade, em particular numa parede ou numa cobertura é árdua e complexa. Mas um controlo inexistente pode dar origem a danos ou a um envelhecimento prematuro dos materiais de construção. A necessidade de ter melhores ferramentas de cálculo higrotérmico foi despoletada pelos inúmeros danos provocados pela humidade [21]. Atendendo que não há dúvida de que a presença de humidade tem uma influência importante no desempenho e vida útil dos materiais de construção, a previsão do comportamento higrotérmico tornou-se determinante. No passado, estas previsões foram em grande parte realizadas com base em experiências práticas e ferramentas de cálculo simplificadas, como o método de Glaser em regime estacionário [vd.4.4.2.3]. Este é inadequado para fazer uma avaliação higrotérmica para um projecto de reabilitação [33]. Houve então uma crescente exigência pela criação de ferramentas de simulação para elaboração de projectos higrotérmicos e trabalhos de investigação. Consequentemente, foi criada a norma europeia EN 15026 [11], que é amplamente baseada na WTA<sup>7</sup> Orientação 6-2, e tem como propósito a avaliação dos resultados provenientes de simulações higrotérmicas, a fim de prever o risco de degradação de materiais de construção, devido à presença de humidade. De forma a cumprir a WTA 6-2 ou a EN 15026, as ferramentas de simulação higrotérmica em regime não estacionário (variável) têm de incluir os fenómenos de transporte e armazenamento de calor e humidade, presentes na Tabela 1.

---

<sup>7</sup> WTA- International Association for Science and Technology of Building Maintenance and Monument Preservation

Tabela 1 - Fenómenos presentes na elaboração das equações de transferência de calor e umidade da norma EN15026

Fenómenos	Relacionados com o calor	Armazenamento de calor em materiais secos ou húmidos
		Transferência de calor com o coeficiente de condutibilidade térmica dependente do teor de água presente nos materiais
		Transferência de calor latente por difusão de vapor de água com mudança de fase (evaporação de vapor/ condensação)
	Relacionados com a umidade	Armazenamento de umidade por adsorção e desadsorção de vapor de água e forças capilares <sup>8</sup>
		Transporte de umidade por difusão de vapor de água
		Transporte de água líquida <sup>9</sup> por difusão de superfície e condução capilar

Como exemplo de aplicação desses fenómenos, são seguidamente apresentadas as equações diferenciais empregues pelo modelo de simulação higrotérmica [11] estabelecida pelo WUFI:

Equação de equilíbrio da umidade:

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D\phi \cdot \nabla \phi + \delta p \cdot \nabla (\phi \cdot p_{\text{sat}})) \quad (2-1)$$

Equação de equilíbrio de calor:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + h_v \cdot \nabla (\delta p \cdot \nabla (\phi \cdot p_{\text{sat}})) \quad (2-2)$$

em que:

$\phi$  - Umidade relativa;  $t$  – tempo;  $T$  – temperatura;  $w$  – teor de água;  $p_{\text{sat}}$  - pressão de vapor de saturação;  $\lambda$  - condutibilidade térmica;  $H$  – entalpia<sup>10</sup>;  $D\phi$  - coeficiente de transferência de água líquida;  $\delta p$  – permeabilidade ao vapor;  $h_v$  – calor latente com mudança de estado.

O lado esquerdo da equação 2-1 representa o armazenamento de umidade que é proporcional à derivada da *curva de armazenamento de umidade* ( $\partial w / \partial \phi$ ) [vd.3.3.1] e o lado direito traduz as condições de transporte descritas pela divergência de fluxo líquido e de

<sup>8</sup> Fase compreendida entre os 95% e os 100% da *curva de armazenamento de umidade*, também designada por região de água capilar [vd.3.3.1].

<sup>9</sup> Grandeza analisada mais em pormenor em 3.3.2; É caracterizada por dois coeficientes: *coeficiente de transferência de água líquida por sucção* e *coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição*.

<sup>10</sup> Transformação num sistema termodinâmico a pressão constante, sendo o aumento de entalpia o valor do calor absorvido pelo sistema. A entalpia é uma função de estado, depende da temperatura, pressão e volume [30].

vapor de água. Apesar da pressão de vapor ( $P_v = \phi \cdot p_{sat}$ ) ser a força motriz para o fluxo de vapor e depender fortemente da temperatura ( $p_{sat}$  varia exponencialmente com a temperatura), o fluxo líquido é regido por forças capilares [vd.3.3.2], que variam em função da humidade relativa, como se pode ver na equação de Kelvin da EN15026 (equação 3-3).

No que refere à equação de equilíbrio de calor (equação 2-2), esta é obtida pela derivada da entalpia em ordem à temperatura e ao tempo. Em regime estacionário, como a temperatura é constante ao longo do tempo, a derivada da temperatura em ordem ao tempo é igual a zero, o que faz com que a variação da entalpia em ordem ao tempo também seja nula. Desta forma, explica-se que o fluxo de calor unidireccional em regime estacionário seja constante. Já em regime variável existe variação da temperatura em ordem ao tempo, assim, a variação da entalpia em ordem ao tempo não é nula, o que dá origem a um fluxo de calor variável. O termo do lado direito da equação de energia contém a capacidade calorífica do material seco e a entalpia da água absorvida pelo material [44].

## 2.4. Dados de Input e Output

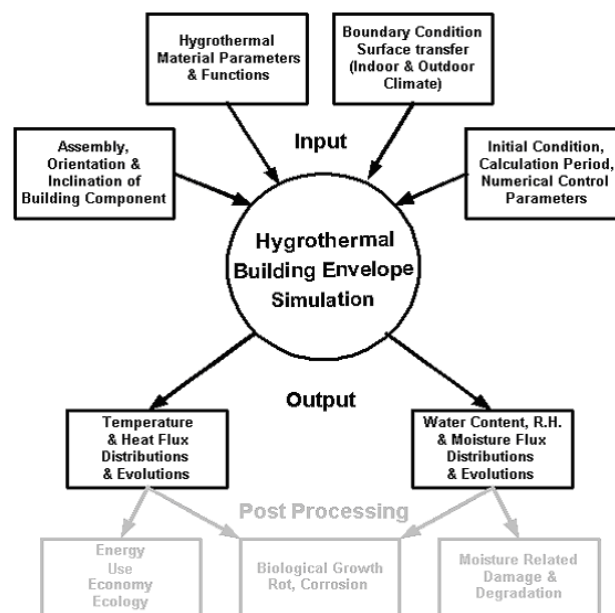


fig. 2 - Fluxograma sobre o processamento / organização do modelo de simulação higrotérmica [11]

A execução de simulações higrotérmicas, incluindo *inputs* e *outputs* está descrita de forma resumida pelo fluxograma da EN 15026 [vd.fig. 2]. Como primeiro *input*, é necessário definir a solução construtiva e a respectiva exposição, orientação e inclinação [vd.4.2.1 e 4.2.2] da envolvente do edifício sob análise. Em seguida, os parâmetros dos materiais para todas as camadas de solução construtiva têm que ser seleccionados a partir de uma base de

dados de materiais existente no WUFI, ou então indicados pelo utilizador. As propriedades necessárias [vd.3] para a definição do material são:

- Massa volúmica ( $\rho$ ) em  $\text{kg/m}^3$ ;
- Calor específico ( $c$ ) em  $\text{kJ/(kgK)}$ ;
- Condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) em  $\text{W/mK}$  da matéria seca e dependência com a humidade;
- Porosidade ( $\epsilon$ ) em  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;
- *Curva de armazenamento de humidade*;
- Permeabilidade ao vapor, em  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$  que pode depender da humidade do ar ambiente;
- Coeficiente de transferência de água líquida -  $D_w$  em  $\text{m}^2/\text{s}$ , para a fase de absorção de água (fase de humedecimento) e redistribuição (fase de secagem).

Quando todas as propriedades higrotérmicas dos materiais da solução construtiva são especificados, selecciona-se as condições de fronteira [vd.4.4]. A fim de obter uma simulação realista do desempenho higrotérmico da envolvente de construção exposta ao ambiente exterior, os seguintes parâmetros climáticos devem ser fornecidos:

- Temperatura do ar exterior;
- Humidade relativa exterior;
- Radiação de onda curta (global e radiação solar difusa);
- Radiação de onda longa (radiação térmica do céu e radiação terrestre);
- Precipitação (quantidade da chuva);
- Velocidade e direcção do vento, para todo o período de simulação;
- Temperatura do ar interior;
- humidade relativa interior.

Devido às variações diurnas das condições climáticas, devem usar-se conjuntos de dados meteorológicos horários. Para o ficheiro climático de Lisboa<sup>11</sup> existe um clima típico (*Test Reference Years*), que é composto pela média de dados meteorológicos. É importante salientar, que para o WUFI os ficheiros climáticos representam climas típicos e não anos individuais (por exemplo os dados meteorológicos do ano de 2009).

---

<sup>11</sup> Ficheiro climático usado em todas as simulações higrotérmicas realizadas nesta dissertação.



No que refere ao ambiente interior [vd.4.4.2] este mostra uma menor flutuação, permitindo que dados médios anuais possam ser suficientes para muitas aplicações [64].

O impacto do exterior e das condições do interior na envolvente do edifício também são controlados pelos *coeficientes de transferência de superfície* [vd.4.2.3], que descrevem os processos de transporte na superfície exterior e interior. Considera-se a existência de um “filme de ar estagnado” na superfície que actua como uma resistência ao calor [vd.4.2.3.1.1] e ao fluxo de vapor de água [vd.4.2.3.1.2]. Outros parâmetros poderão ser adicionados, como o coeficiente de absorção de radiação solar de onda curta ( $\alpha_s$ ) [vd.4.2.3.1.3], a emissividade ( $\varepsilon$ ) [vd.4.2.3.1.4] e a espessura da camada de ar de difusão equivalente ( $S_d$ ) [vd.4.2.3.1.2].

O último bloco de entrada representado na fig. 2 contém as condições iniciais (temperatura e humidade relativa em cada material) [vd.4.2.4] e especificações de cálculo (duração, precisão numérica, etc.)

Os resultados da simulação higrotérmica apresentados nos dois blocos de saída da fig. 2 consistem em fluxos de calor, humidade e distribuições de temperatura, humidade relativa e teor de água na secção transversal da solução construtiva. Como a simulação é realizada em regime variável, os valores destas grandezas não são constantes, nem variam linearmente. Estes podem ser apresentados em *courses*<sup>12</sup> ou *profiles*<sup>13</sup>. Uma apresentação comum dos resultados é a visualização passo a passo das distribuições transitórias em “filme” [vd.4.5.6]. A fim de avaliar o desempenho higrotérmico (o chamado pós-processamento) de uma determinada solução de construção, estes resultados têm de ser interpretados. Este assunto será analisado no subcapítulo 2.7.

## 2.5. Pressupostos e simplificações do modelo higrotérmico

Os componentes do modelo higrotérmico foram desenvolvidos sob os seguintes pressupostos, que constam na norma EN15026 [11]:

- Geometria constante, sem dilatações e retracções dos materiais ao longo do período de cálculo, algo que na realidade nem sempre acontece; é o caso da variabilidade dimensional da alvenaria de tijolo cerâmico, quando apresenta elevados teores de água ou está sujeita a elevadas temperaturas (expansão higrotérmica);
- Nenhuma reacção química que possa ocorrer é considerada (devido à variação das propriedades dos materiais por estarem em contacto com os agentes atmosféricos);

---

<sup>12</sup> Variação de uma grandeza durante o período de cálculo, para uma dada localização específica da solução construtiva.

<sup>13</sup> Variação de uma grandeza ao longo da secção transversal, para um específico período de tempo.

- Não se tem em conta a variação das propriedades dos materiais por sofrerem danos ou envelhecimento;
- A dependência da temperatura pela *curva de armazenamento de humidade* é negligenciada;
- A formação de gelo não é considerada [42].

## 2.6. Limitações do modelo higrotérmico

O modelo higrotérmico usado pelo programa WUFI apresenta algumas limitações, ou seja, existem determinados casos onde não deve ser usado, tais como:

- Quando há convecção através de aberturas e fissuras nos materiais;
- Quando efeitos bidimensionais têm um peso relevante, caso do fenómeno de ascensão capilar (limitação apenas para a versão unidimensional);
- Quando forças hidráulicas, osmóticas estão presentes;
- Quando a temperatura média diária na solução construtiva ultrapassar os 50 ° C;
- Nas caixas-de-ar não tem em conta os fenómenos de convecção e radiação na transferência de calor [vd.3.3.7].

## 2.7. Interpretação e avaliação de resultados (pós-processamento)

Após a obtenção das grandezas enunciadas no subcapítulo 2.4, deve começar por ser verificado se as variações decorrentes de temperatura, humidade relativa e o teor de água não excedem os limites estabelecidos para os materiais. Então, o equilíbrio de humidade anual deve ser analisado. Os materiais de construção que contêm sempre alguma humidade inicial, após o início da simulação devem começar o seu processo de secagem. Quando existe uma acumulação de humidade contínua é geralmente um sinal de fracasso. Contudo, estes critérios de falhanço podem não ser suficientes para garantir um bom desempenho a longo prazo da componente de construção. Portanto, pós-modelos especiais de processos podem ser necessários para uma interpretação satisfatórios dos resultados. Estes modelos utilizam os resultados provenientes de simulações higrotérmicas como *inputs* (blocos a cinzento da fig. 2), obtendo-se posteriormente resultados que são comparados com os critérios de desempenho para o consumo de energia, o risco de degradação, o apodrecimento dos materiais, o risco de corrosão e o risco de proliferação de bolores/fungos [44].

## 2.8. Falhas ou limitações do WUFI

### 2.8.1. Inércia térmica

A inércia térmica de um edifício ( $I_t$ ) define a sua maior ou menor capacidade para amortecer e desfasar no tempo as variações da temperatura interior face à flutuação da temperatura exterior. É vantajoso que os edifícios apresentem uma significativa inércia, o que se consegue com o aumento da massa dos elementos de construção que estão pelo interior da camada de isolamento térmico [8].

Ao contrário de outros programas como o EnergyPlus<sup>14</sup>, em que se pode estudar a  $I_t$ , com o WUFI tal não é possível. A razão é que enquanto o EnergyPlus é baseado no método fundamental do balanço de calor, tendo como objectivo o cálculo das cargas de aquecimento e ventilação [4], o WUFI tem como objectivo o cálculo da carga higrotérmica dentro de um edifício. A impossibilidade de avaliar a  $I_t$  reside na forma como o WUFI calcula a temperatura do ambiente interior. Este não tem em conta a solução construtiva, ou seja, independentemente da qualidade térmica da solução, o valor da temperatura interior será sempre o mesmo. Para a determinação da temperatura interior, o WUFI dispõe de 3 formas de cálculo: funções sinusoidais [vd.4.4.2.2], norma EN13788 [vd.4.4.2.3] e norma EN15026 [vd.4.4.2.4]. Nestas três formas, o WUFI dispõe de um *input* que permite ao utilizador definir uma temperatura para o ambiente interior para todo o período de simulação. Desta forma, o WUFI apenas permite calcular o fluxo de energia que atravessa a solução construtiva, sendo impossível a avaliação da  $I_t$ .

### 2.8.2. Sombreamento

No que refere ao sombreamento, a possibilidade de ser inserido como *input* não é possível com o WUFI. Este aspecto seria particularmente interessante, pois da mesma forma que o meio circundante a uma parede exterior afecta a *quantidade de chuva incidente* que atinge a superfície da parede, também pode afectar a quantidade de radiação solar directa recebida por essa mesma superfície. A única possibilidade em alterar o valor da radiação solar directa, ou seja, de contabilizar a existência de um sombreamento, seria alterar os valores de radiação solar directa no ficheiro climático. Este é um processo, que além de muito laborioso, não é de fácil determinação. O ideal seria que houvesse um coeficiente que permitisse ter em

---

<sup>14</sup> Software de cálculo térmico.

conta o sombreamento, à semelhança do que acontece no cálculo da quantidade da chuva incidente [vd.4.2.2].

### 3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS PELO PROGRAMA PARA O CÁLCULO DAS SIMULAÇÕES HIGROTÉRMICAS

#### 3.1. Introdução

Neste capítulo será feita uma compilação das principais propriedades dos materiais de construção necessárias para realização de simulações numéricas executadas no programa WUFI, referenciando-se também as normas e metodologias que permitem a sua determinação [23].

#### 3.2. Propriedades básicas

##### 3.2.1. Massa volúmica [kg/m<sup>3</sup>]

A massa volúmica ( $\rho_{bulk}$ ) é uma grandeza que tem como funcionalidade para o programa, fazer a conversão de calor específico mássico (J/kgK) para calor específico por volume (J/m<sup>3</sup>K). O seu valor é determinado através do quociente entre a massa ( $m$ ) e o volume total ( $V_{tot}$ ) da amostra [58].

$$\rho_{bulk} = \frac{m}{V_{tot}} \quad (3-1)$$

##### 3.2.2. Porosidade [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

A grandeza porosidade é necessária para a caracterização de materiais com capacidade de absorção de vapor de água ou água líquida, permitindo desta forma determinar o teor de humidade máximo ( $W_{m\acute{a}x}$ ), que é obtido a partir do produto entre a porosidade e a massa volúmica da água. Como a maioria das simulações higrotérmicas não são sensíveis ao valor exacto  $W_{m\acute{a}x}$  – *maximum saturation* (pois raramente se encontra o teor de água acima do *free saturation*<sup>15</sup> [vd.3.3.1]), é geralmente suficiente estimar um valor, caso o valor de  $W_{m\acute{a}x}$  não seja conhecido para o material em questão.

O  $W_{m\acute{a}x}$  é obtido a partir da água resultante da actividade capilar (o valor de *free saturation*), e da água que é adicionalmente absorvida através da difusão de vapor e que posteriormente condensa. A porosidade pode ser medida com intrusão de mercúrio [59] e ser estimada através da massa específica ( $\rho_{true}$ ) e da massa volúmica ( $\rho_{bulk}$ ) [vd.3.2.1]:

$$Porosidade = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{true}} \quad (3-2)$$

---

<sup>15</sup> É identificado como o teor de água que o material apresenta quando atinge a Humidade Relativa igual a 100%, ou seja, quando atinge o limite de saturação.

### 3.2.3. Calor específico [J/kgK]

O valor de calor específico mássico que se deve colocar é referente a condições de material completamente seco. Ao usar-se o calor específico por unidade de massa tem como vantagem este valor depender unicamente da composição química do material, não dependendo da sua porosidade [vd.3.2.2]. Por exemplo, blocos de cimento com massas volúmicas de  $400 \text{ kg/m}^3$  e  $600 \text{ kg/m}^3$  têm o mesmo calor específico por unidade de massa.

Para obter o calor específico por volume (que entra na equação geral de difusão de calor), o WUFI multiplica o calor específico pela massa volúmica [vd.3.2.1].

Os valores mais usados correntemente pelo programa são  $850 \text{ J/kgK}$  para matérias minerais e  $1500 \text{ J/kgK}$  para materiais orgânicos.

Uma vez que quase todas as simulações não serão realizadas para materiais num estado seco (teor de água nulo), o WUFI permite calcular a capacidade de calor adicional proveniente do teor de água, caso este exista [vd.Tabela 1].

### 3.2.4. Condutibilidade térmica de um material seco [W/mK]

A condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) é uma característica própria de cada material que traduz a forma como o material se deixa atravessar pelo calor [30]. À semelhança do calor específico, a condutibilidade térmica que é inserida no WUFI é para condições de material completamente seco. A dependência do valor da condutibilidade térmica com a humidade é opcional, contudo deve ser tida em conta, uma vez que para situações em que o material não se encontra seco, o seu valor de condutibilidade térmica tende a ser maior [30].

### 3.2.5. Factor de resistência à difusão de vapor de água para um material seco - $\mu$ [-]

O factor de resistência à difusão de vapor de água ( $\mu$ ) que se coloca como *input* é igualmente para condições de material seco, sendo um factor adimensional que relaciona as permeabilidades ao vapor de água do material e do ar. A dependência deste com a humidade, à semelhança do que acontece com a condutibilidade térmica é opcional [vd.3.3.5].

O ensaio utilizado para a determinação do seu valor é composto por duas tinas, uma seca do lado exterior do material com uma humidade relativa de 50% e outra tina saturada no interior, com uma humidade relativa de 95%. Dadas estas condições, irá haver transferência de fluxo de vapor do interior para o exterior, que permitirá obter o valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material ( $\delta p$ ), que é inversamente proporcional ao factor de resistência à difusão de vapor de água ( $\mu$ ) [50].

### 3.3. Propriedades adicionais

#### 3.3.1. Curva de armazenamento de humidade

##### 3.3.1.1. Intervalos da curva de armazenamento de humidade

O teor de humidade dos materiais pode variar entre o zero absoluto e um valor máximo ( $W_{\text{máx}}$ ), existindo diversas fases, entre estes dois valores. No WUFI, o teor de humidade é obtido pela *curva de armazenamento de humidade*, onde existem três intervalos que representam as diferentes fases. O primeiro é o *intervalo higroscópico*, está presente até a uma humidade relativa de 95%; seguido de um outro entre a humidade relativa dos 95 até aos 100%, o *intervalo capilar*, e um último correspondente a humidades relativas iguais a 100%, quando se registam as condensações.

No *intervalo higroscópico*, o teor de humidade apresentado pelo material é consequência do contacto com um ambiente com humidades relativas altas (acima do valor crítico, isto é, acima do valor de humidade relativa que o material começa a reter alguma humidade) durante longos períodos, resultando na fixação de moléculas de água nas paredes dos poros por *adsorção* [vd.3.3.8]. Esta fixação é conferida pelas forças intermoleculares, ou *Van Der Waals*, que actuam na interface sólido-fluido no interior dos poros [24]. Podem distinguir-se diferentes etapas deste processo: *adsorção* monomolecular, com a fixação de uma camada de moléculas de água sobre a superfície dos poros; *adsorção* plurimolecular, com a fixação de várias camadas sobre a primeira adsorvida; e por fim, condensação capilar sobre os meniscos formados pela junção das camadas plurimoleculares [vd.fig. 3].

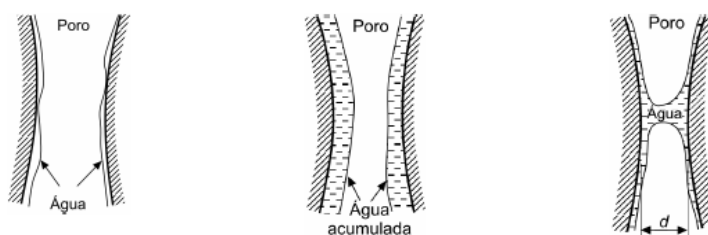


fig. 3 – Etapas da fixação de água por *adsorção* ao nível de um poro[49]

A tradução gráfica da relação entre o valor de equilíbrio do teor de humidade de um material no *intervalo higroscópico* e a humidade relativa da ambiência correspondente, permite representar a sua curva higroscópica [vd.fig. 4].

No *intervalo higroscópico*, o número de moléculas adsorvidas é, por um lado, determinado pela humidade absoluta no ar dos poros (a maior concentração de vapor de água

causa uma maior taxa de choque nas paredes dos poros e, assim, uma maior taxa de *adsorção*), e por outro, pela temperatura (a temperatura mais elevada provoca uma maior taxa de *desadsorção* [vd.3.3.8]). Como esses dois factores se contrariam um ao outro, o teor de humidade de equilíbrio resultante é determinado em função da humidade relativa do ar dos poros, havendo uma proporcionalidade entre estas duas grandezas [vd.fig. 5].

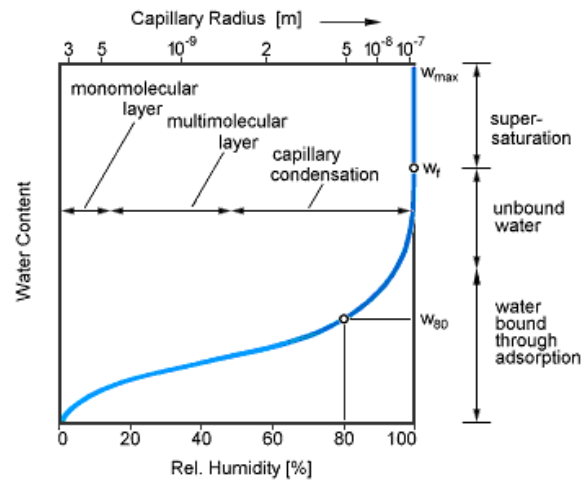


fig. 4- Curva de armazenamento de humidade, relação entre o teor de água [kg/m<sup>3</sup>] e HR [%]

Na *região capilar*, o teor de água nos poros deixa de depender da humidade relativa, para passar a depender das forças de pressão capilar. Como se pode ver pela fig. 5 e pela equação de Kelvin (equação 3-3) [11], quanto menor é esta pressão, maior será o teor de água.

$$\phi = \exp\left(-\frac{p_c}{p_w \cdot R_d \cdot T}\right) \quad (3-3)$$

em que:

$\phi$  [%]: humidade relativa

$p_c$  [Pa]: pressão capilar dentro dos poros

$p_w$  [kg/m<sup>3</sup>]: massa específica do vapor de água

$R_d$  [Pa m<sup>3</sup>/(kg K)]: constante da mistura ar seco / vapor de água

$T$  [K]: temperatura



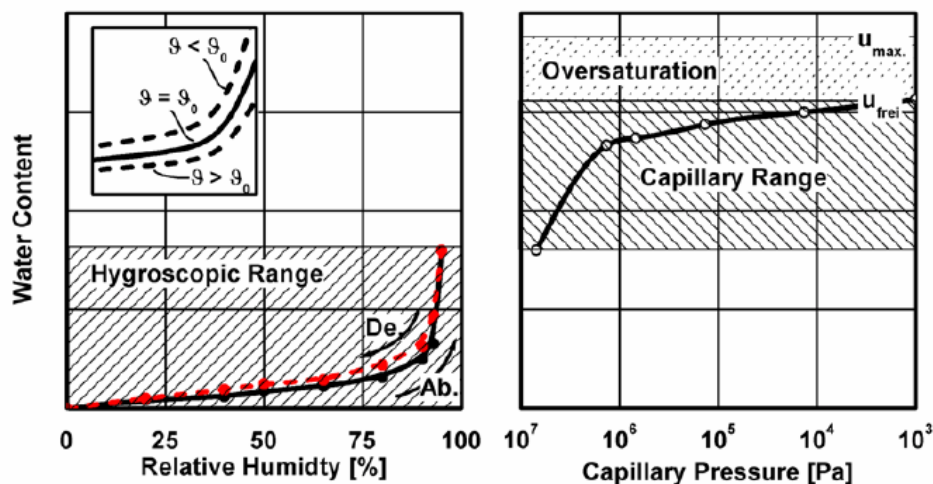


fig. 5 – Três intervalos da Curva de armazenamento de humidade: intervalo higroscópico, intervalo capilar e intervalo acima do limite de saturação [50]

Nesta região de *capilaridade*, existe um aumento do teor de água líquida até se atingir a saturação à pressão normal - *free saturation* -  $W_f$ . Este teor de água na *curva de armazenamento de humidade* corresponde a uma humidade relativa igual a 100% (limite de saturação). Desta forma, em materiais higroscópicos existe água líquida, mesmo para valores de humidade relativa abaixo dos 100% [vd.fig. 4]. Se o material for susceptível à ocorrência de danos (crescimento de fungos, podridão, gelividade) devido à presença de humidade, é natural que se verifique alguma degradação para valores de humidade relativa a partir dos 80% [46], abaixo do que normalmente se chama condensação (humidade relativa igual a 100%). Nestes casos, o fenómeno de condensação não é um critério útil para avaliar o risco de degradação, devendo-se optar pelo critério do teor de humidade.

Em situações onde se atinge a saturação (humidade relativa igual a 100%), a existência de bolsas de ar aprisionadas na estrutura dos poros faz com que o  $W_f$  seja menor do que o  $W_{max}$ . Os teores de humidade superiores à  $W_f$  (na *supersaturated region*), resultam da ocorrência de condensações, que começam a encher as bolsas de ar até ficarem completamente cheias de água, atingindo-se nesta fase  $W_{max}$  [64]. É importante referir que nesta situação de condensação já não existe transporte de água líquida, atingindo-se a maior acumulação de água em estado líquido pelo transporte de vapor e posterior condensação [64].

Por último, importa referir que ao contrário das camadas de ar [vd.3.3.7], a *curva de armazenamento de humidade* de materiais higroscópicos não depende da temperatura. Deste modo, uma diminuição da temperatura poderá não causar condensações, o que já não sucede numa caixa-de-ar.

### 3.3.1.2. Construção da curva de armazenamento de humidade

No WUFI, a *curva de armazenamento de humidade* é descrita através de uma tabela com duas colunas: humidade relativa e o teor de humidade correspondente. Na zona de separação entre o *intervalo higroscópico* e o *intervalo capilar* existe uma variação brusca (quase assintótica) na *curva de armazenamento de humidade* [vd.fig. 6], daí a necessidade de maior detalhe, devendo-se então colocar mais entradas na tabela.

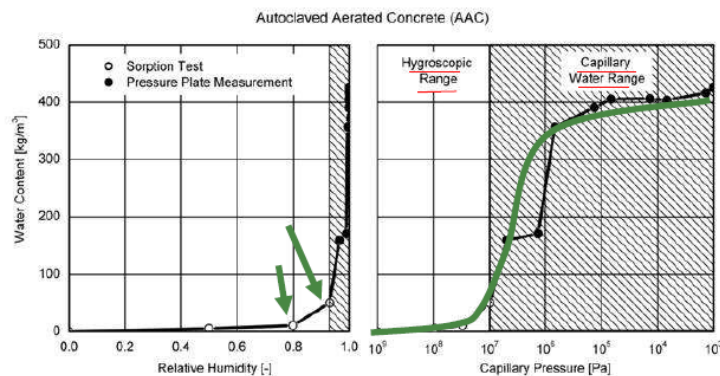


fig. 6 - Passagem da zona higroscópica para a zona de água capilar na *curva de armazenamento de humidade*

Como já referido em 3.3.1.1, o WUFI permite que haja aumento do teor de humidade na *supersaturated region*, no entanto, nesta região onde a humidade relativa é sempre 100% e o teor de humidade varia entre  $W_f$  e  $W_{max}$ , não há uma relação funcional entre a humidade relativa e o teor de humidade, o que é necessário para a construção da tabela que descreve a *curva de armazenamento de humidade*. Na realidade, nesta região o teor de humidade é determinado pelas condições de fronteira: aumenta em condições de condensação e diminui em condições de evaporação. Assim, com o intuito de tratar estes teores de humidade acima de  $W_f$ , o WUFI internamente amplia a tabela de cada material, introduzindo uma entrada adicional. Portanto, os teores de humidade entre  $W_f$  e  $W_{max}$  são associados a humidades relativas entre 1 e 1,01. É claro que estas humidades relativas são fictícias, mas permitem que o WUFI continue a atribuir uma humidade relativa única para cada teor de água, como exigido pelas equações de transporte de humidade [62].

Por último importa mencionar como o WUFI constrói a *curva de armazenamento de humidade* para materiais não higroscópicos. Nestes materiais (essencialmente materiais isolantes e camadas de ar) o teor de humidade é sensivelmente zero na região de humidade relativa entre os 0 e os 100%. Para uma humidade relativa igual a 100%, o teor de humidade tem um valor indeterminado entre zero e  $W_{max}$ , não existindo nenhuma relação bem definida

entre eles. Uma vez que o WUFI para a realização das simulações higrotérmicas necessita de um campo de humidades bem definido em cada passo de tempo (iteração), atribui uma *curva de armazenamento de humidade* artificial para todos os materiais que nominalmente não têm qualquer teor de humidade apreciável [63]. Portanto, nos resultados de uma simulação higrotérmica do WUFI, pode-se observar valores do teor de humidade (ainda que baixos), mesmo em materiais não higroscópicos para os quais não é definida uma *curva de armazenamento de humidade* na base de dados do programa.

### 3.3.2. Coeficiente de transferência de água líquida

O mecanismo predominante de transporte de humidade em materiais porosos é o transporte líquido capilar. Embora seja basicamente um fenómeno de convecção, no contexto da física das construções é suficiente tratá-lo como um fenómeno de difusão (baseando-se na lei de Fick):

$$gw = -D_w(w) \cdot \text{grad } w \quad (3-4)$$

em que:

$gw$  [kg/m<sup>2</sup>s]: densidade do fluxo de humidade

$w$  [kg/m<sup>3</sup>]: teor de água

$D_w$  [m<sup>2</sup>/s]: *coeficiente de transferência de água líquida*

A lei de Fick normalmente é aplicada apenas ao transporte de vapor de água no regime higroscópico. Mas a utilização do teor de água do material como potencial (e não o coeficiente de permeabilidade ao vapor, como é normal), permite estender a sua utilização ao regime sobre-higroscópico (região de capilaridade), determinando a densidade de fluxo de humidade ( $gw$ ).

O *coeficiente de transferência de água líquida por sucção* ( $D_{ws}$ ) descreve a absorção capilar de água quando a superfície absorvente (neste caso a superfície do paramento exterior) está totalmente húmida. No âmbito da física das construções este coeficiente traduz o efeito da chuva sobre uma fachada, no que diz respeito à mudança do valor de teor de água que os materiais passam a apresentar. O transporte de água líquida é dominado pelos capilares maiores, desde que a sua reduzida resistência ao fluxo capilar, compense a sua baixa tensão capilar.

O *coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição* ( $D_{ww}$ ) descreve a

propagação da água absorvida quando o humedecimento estiver concluído, ou seja, quando não há mais entrada de água vinda do exterior (a chuva cessa) e a água presente no material começa a redistribuir-se (fase de secagem), havendo migração de humidade para o exterior. Uma vez que a redistribuição tem lugar nos capilares menores, que apresentam uma alta resistência ao fluxo, o  $D_{WW}$  é geralmente bastante menor que o  $D_{WS}$ , dado ser um processo mais lento. Face ao referido, pode-se dizer que o WUFI usa dois *coeficientes transferência de água líquida*. A forma como estes coeficientes são usados depende das condições de fronteira (se há chuva ou não) [37].

Para o transporte de água capilar o teor de água é a força motriz. Mas o teor de água depende da humidade relativa (relação estabelecida através da *curva de armazenamento de humidade*), podendo então afirmar-se que a humidade relativa é a força motriz do transporte capilar [62]. O WUFI constrói a relação do *coeficiente de transferência de água líquida* com o teor de humidade através da construção de uma tabela, à semelhança que existe para a elaboração da *curva de armazenamento de humidade* [vd.3.3.1.2].

Infelizmente os valores para o *coeficiente de transferência de água líquida* estão apenas disponíveis para um número relativamente pequeno de materiais [64], sendo necessário estimá-los a partir de outras propriedades de valor conhecido. Para a maioria dos materiais de construção, o aumento da  $D_{WS}$  com o teor de humidade pode ser descrito por uma função exponencial. Nestas condições, há a seguinte relação aproximada entre a  $D_{WS}$  e o valor do coeficiente de absorção (A) [62]:

$$D_{WS}(W) = 3,8 \cdot \left(\frac{A}{w_f}\right)^2 \cdot 1000^{(w/w_f)-1} \quad (3-5)$$

em que:

$D_{WS}$  [m<sup>2</sup>/s]: *coeficiente de transferência de água líquida por sucção*

A [kg/m<sup>2</sup>√s]: *coeficiente de absorção de água*

w [kg/m<sup>3</sup>]: *teor de água*

$w_f$  [kg/m<sup>3</sup>]: *free water saturation*

O WUFI permite gerar automaticamente uma tabela com o *coeficiente de transferência de água líquida* estimado para a fase de capilaridade. Apenas o coeficiente A precisa de ser inserido e o programa usará este valor, a função de armazenamento de humidade e a equação 3.5, permitindo definir a relação entre o *coeficiente de transferência de água líquida* e o teor de água. No entanto, deve-se ter em conta que este método é apenas uma estimativa, mas que

é necessariamente útil para os materiais que não tenham um *coeficiente de transferência de água líquida* definido [62].

### 3.3.3. Comparação entre o transporte de água líquida, difusão de vapor de água e condutibilidade térmica

Ao existir transporte de água líquida, este é largamente superior ao valor de difusão de vapor de água, devendo ser analisado com cuidado, quando tem impacto sobre a envolvente do edifício, por exemplo na situação de ocorrência de chuva incidente. Em contraste com a condutibilidade térmica e difusão de vapor, o transporte de água líquida tem uma relação altamente não linear (aumento exponencial) com o teor de água do material. Na fig. 7 está exposta a evolução do valor  $D_{ws}$  e  $D_{ww}$  [vd.3.3.2] em relação ao *teor de água normalizado* para um bloco de betão celular autoclavado. Os valores destes coeficientes variam para um factor de quase 100 vezes entre o equilíbrio do teor de água, para uma humidade relativa igual a 80% (ponto inicial das curvas) e *free water saturation* (humidade relativa igual a 100%). Portanto, pode-se concluir que o transporte de água líquida (presente no programa através do *coeficiente de transferência de água líquida*  $D_w$ ) tem um papel significativo quando os materiais porosos estão húmidos, enquanto a sua influência diminui rapidamente quando o material está a secar.

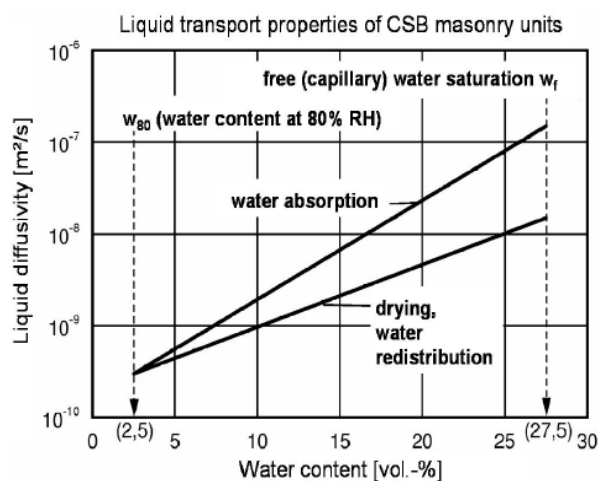


fig. 7- Transporte de água capilar de um bloco de betão celular autoclavado determinado por medições variáveis de absorção e redistribuição de água[44].

### 3.3.4. Condutibilidade térmica em função do teor de humidade

A condutibilidade térmica de um material no estado seco é um parâmetro básico e indispensável [vd.3.2.4]. Além disso, se a dependência da condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) em

relação ao teor de humidade ( $w$ ) for tida em conta, o WUFI dispõe de uma tabela para cada material com os dados que relacionam estas duas grandezas, obtida a partir da expressão:

$$\lambda(w) = \lambda_o \left( 1 + b \cdot \frac{w}{\rho_s} \right) \quad (3-6)$$

em que:

$\lambda(w)$  [W/mK]: condutibilidade térmica em função de um determinado teor de água

$\lambda_o$  [W/mK]: condutibilidade térmica para um teor de água nulo

$\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>]: massa volúmica do material

$b$  [%/M.-%]: condutibilidade térmica complementar em função do teor de água

O factor  $b$  dá o crescimento em percentagem da condutibilidade térmica por massa e por percentagem de humidade. O seu valor depende do tipo de material e das suas propriedades, nomeadamente a massa volúmica. No Anexo 1 - Tabela 1 apresentam-se alguns valores de  $b$  que existem na base de dados do programa.

No contexto apresentado, a condutibilidade térmica "de materiais húmidos" significa exclusivamente a influência da água estacionária no transporte de calor. Mas o fenómeno de difusão de vapor de água com mudança de estado físico (isto é: água evaporando num dos lados da amostra e condensando do outro lado) também contribui para esse transporte, sendo contabilizado à parte (através do calor latente). Desta forma, encontra-se em separado da condutibilidade térmica do material na equação de equilíbrio de calor (equação 2.2). No entanto, atendendo às técnicas de medição padrão de  $\lambda$  (ensaio de Placa Quente [50]), o efeito de difusão de vapor de água no transporte de calor (devido apenas a condutibilidade térmica dos materiais) é normalmente incluído, devendo os resultados das medições em materiais permeáveis (p.e., lã mineral) ser encarados com cautela.

### 3.3.5. Factor de resistência à difusão de vapor de água em função da humidade

*O factor de resistência à difusão de vapor de água ( $\mu$ ) do material em estado seco é um parâmetro base dos materiais. Além disso, se a dependência de  $\mu$  com o teor de humidade for tido em conta, o WUFI opcionalmente pode utilizar uma tabela com estas duas grandezas, como entradas. No entanto, em materiais minerais a redução de  $\mu$  com o aumento do teor de*

humidade, como é evidenciado na norma EN12524 [10], é devido à *difusão de superfície*<sup>16</sup> [37]. Este fenómeno pode também ser incluído na condução capilar [42] [vd.fig. 8], devendo-se nesta situação, utilizar-se um valor de  $\mu$  constante e escolher um *coeficiente de transferência de água líquida* adequado [vd.3.3.2].

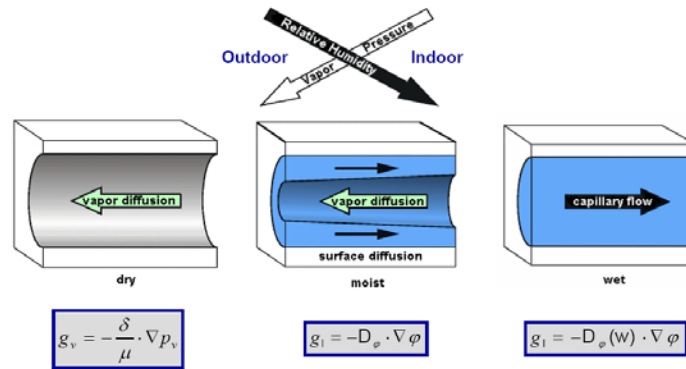


fig. 8 – Fenómenos de difusão de vapor, *difusão de superfície* e condução capilar [42]

Para casos em que o teor de humidade se encontra acima do *free saturation* ( $w_f$ ), o WUFI irá reduzir  $\mu$  até atingir a resistência à difusão de vapor igual a zero no *maximum saturation* ( $W_{max}$ ). Isso reflecte o facto de o teor de humidade ir aumentando até ao ponto em que os capilares maiores se tornam obstruídos com água, não podendo desta forma, contribuir mais para o transporte de vapor de água.

### 3.3.6. Difusão de vapor de água

Nos materiais porosos a difusão de vapor de água ocorre da mesma forma que no ar, mas é condicionada pela redução do espaço disponível e pelo aumento do seu percurso devido aos efeitos de *adsorção* (número de moléculas de água fixadas às paredes dos poros) e sinuosidade da estrutura dos poros, respectivamente. O referido condicionamento traduz-se numa maior resistência à difusão ( $\mu$ ) [vd.3.2.5]. No Anexo A - Tabela 2 lista valores de  $\mu$  usados pelo WUFI, para alguns materiais mais comuns.

A densidade do fluxo de vapor de água pela Lei de Fick (usando a pressão parcial de vapor como força motriz [49]) é calculada pela seguinte expressão:

<sup>16</sup> É um fenómeno que corresponde à difusão de vapor de água da superfície, que só ocorre para teores de humidade em que já exista no meio poroso a transferência em série de vapor e água líquida. Este apresenta o mesmo sentido da transferência de água líquida.

$$g_v = -\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3-7)$$

em que:

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s]: densidade do fluxo de vapor de água

$\mu$  [-]: *factor de resistência à difusão de vapor de água*

$p$  [Pa]: pressão parcial de vapor

$\delta$  [kg/(msPa)]: coeficiente de difusão de vapor de água no ar

$$\delta = 2.0 \times 10^{-7} \cdot \frac{T^{0.81}}{P_L} \quad (3-8)$$

em que:

$T$  [K]: temperatura ambiente absoluta

$P_L$  [Pa]: pressão ambiente atmosférica

Em regime permanente, a equação de transporte de vapor de água dá como resultado um valor de densidade do fluxo de vapor de água ( $g_v$ ) constante pois  $\partial^2 p / \partial x^2$  é igual zero e a permeabilidade ( $\pi$  em kg/m<sup>2</sup>s) é constante [30]. Mas num regime variável, o valor de  $g_v$  já não permanece constante ao longo do tempo, tal como acontece para o fluxo de calor. Para esta situação o valor de  $\partial^2 p / \partial x^2$  é diferente de zero (passam a existir valores horários para a pressão parcial de vapor) e a  $\pi$  que é dada pelo quociente entre o coeficiente de difusão do vapor de água no ar ( $\delta$ ) e  $\mu$  também deixa de ser constante, dado que o  $\delta$  é dependente da temperatura e da pressão atmosférica ambiente, que não são constantes ao longo do tempo.

#### - Espessura da camada de ar de difusão equivalente (Sd)

Para uma camada de material com factor de resistência à difusão  $\mu$  e espessura  $s$  (m), do produto destas duas grandezas resulta a espessura de uma camada de ar que seria necessária, a fim de ter a mesma resistência à difusão de vapor que se obtém com a espessura do dado material. Este valor de Sd (m) ou "espessura da camada de ar de difusão equivalente" expressa a resistência à difusão de uma camada, de forma que seja facilmente compreendida e aplicada.

$$Sd = \mu \times s \quad (3-9)$$

Para alguns materiais de construção, apenas a sua resistência à difusão tem importância e não o valor de  $\mu$  e da espessura separadamente, podendo então ser simplesmente



especificados em termos do valor  $S_d$  [vd.4.2.3.1.2], cuja espessura não é necessária para a sua medição [50]. Em particular, o valor  $S_d$  é usado para caracterizar barreiras pára-vapor ( $S_d \geq 10$  m), barreiras de impermeabilização ( $S_d \geq 1000$ m) e revestimentos de superfície (tintas minerais:  $S_d \approx 0,04$  m, tintas a óleo:  $S_d = 1,0$  a  $2,6$  m ), onde é difícil determinar a espessura do material [62].

### 3.3.7. Camada de caixa-de-ar

Nas camadas de caixa-de-ar a humidade relativa depende tanto da temperatura como da concentração de vapor de água. Quando a temperatura desce significativamente, a já baixa capacidade de absorção de vapor de água pelo ar [29] é reduzida (basta ver o diagrama psicométrico [vd.Anexo A - fig. 2]), podendo nesta situação ocorrerem condensações.

O WUFI pode incluir camadas de ar na solução construtiva (no menu *Elemento Construtivo e Posições de Monitorização* [vd.4.2.1]).

Uma vez que WUFI na versão unidimensional é destinado principalmente para materiais sólidos, apenas permite na caixa-de-ar contabilizar a condução de calor e difusão de vapor de água. Assim, para a transferência de calor não são contabilizados fenómenos de convecção e radiação. No que respeita à difusão de vapor de água, não tem em conta que esta também pode ser transferida por convecção. No entanto, estes fenómenos de transporte adicionais podem ser incluídos, ajustando a condutibilidade térmica [vd.3.2.4] e a resistência à difusão [vd.3.2.5] de modo a que os fluxos de calor e humidade resultantes do cálculo sejam correctos.

### 3.3.8. Adsorção, desadsorção e absorção

O fenómeno de *adsorção* é normalmente confundido com a absorção, mas são distintos. Enquanto a *adsorção* é a ligação de moléculas ou partículas a uma superfície (atração física), a absorção é o preenchimento dos poros de um sólido [62]. No caso dos materiais de construção porosos, a *adsorção* é a fixação de moléculas de água às paredes dos poros [49]. Este fenómeno difere então da absorção, no qual um fluido penetra ou é dissolvido por um líquido ou sólido [29].

O fenómeno de *desadsorção* é o inverso da *adsorção*, ou seja, corresponde à diminuição da concentração de vapor de água que está fixada nas paredes dos poros [49]. O termo *sorption* engloba estes dois processos.



## 4. FUNCIONAMENTO GERAL DO PROGRAMA

### 4.1. Introdução

Neste capítulo é feita uma abordagem descritiva ao programa utilizado para a elaboração de todo o trabalho, o WUFI, apresentando o seu funcionamento geral, bem como os diversos campos de entrada necessários para a realização das simulações higrotérmicas que estão presentes nos seguintes menus:

- *Elemento Construtivo e Posições de Monitorização*: é especificada a solução construtiva e as posições para as quais se pretende obter os resultados;
- *Orientação, Inclinação e Altura*: correspondentes às condições de contorno exterior da solução construtiva;
- *Coeficientes de Transferência de Superfície*: tidos em conta de forma a considerar que o valor do fluxo de calor e humidade que atravessa a superfície da envolvente de construção é afectado pelas condições do ambiente circundante;
- *Condições Iniciais*: traduzidas em termos de temperatura e teor de água que a solução construtiva apresenta inicialmente;
- *Controle*: é definido para a simulação higrotérmica o período de simulação, o *time step* e a opção pela consideração ou não de certas propriedades higrotérmicas;
- *Clima*: é indicado o ficheiro climático para o clima exterior, e a forma de definição do clima interior, dentro das várias opções presentes no programa;
- *Outputs*: apresentados em tabelas e gráficos e posteriormente utilizados para efectuar as análises às simulações higrotérmicas.

### 4.2. Elemento Construtivo

#### 4.2.1. Elemento construtivo e Posições de monitorização

Neste menu é definida a solução construtiva para a qual se pretende estudar o comportamento higrotérmico. É especificada a geometria, tanto ao nível da espessura das camadas, como a sequência como estão dispostas. Para cada camada é definido um material que faz parte do “*Material Database*”.

As posições de monitorização são usadas para após o processo de cálculo, se obter com exactidão o valor de alguma grandeza (temperatura, teor de água, pressão parcial de vapor,

entre outras) para a posição pretendida e verificar se para esta existe risco de ocorrência de anomalias (p.e. condensações).

#### 4.2.2. Orientação, Inclinação e Altura

Após a definição da solução construtiva é necessário começar a especificar as condições de contorno exterior (através da orientação geográfica, altura do edifício e o local a que a solução construtiva se encontra em relação à altura do edifício), descrever o tipo de superfície, se é uma parede vertical ou inclinada, se é um pavimento (através do preenchimento do valor da inclinação). A introdução destes *inputs* é de extrema importância, pois consoante o seu valor, o programa vai ler ao ficheiro climático o valor de determinadas parâmetros: intensidade da radiação solar directa e difusa, o valor da quantidade da chuva, o valor da velocidade do vento, entre outros.

De uma forma detalhada:

- O primeiro comando é a *Orientação*, neste deve ser então inserido a orientação geográfica que se encontra a envolvente exterior do edifício. Este *input* é necessário para o cálculo da *quantidade de chuva*, para o cálculo das cargas de radiação, particularmente a radiação directa e difusa [vd.6.3.2.2] e para a velocidade do vento;

- O segundo comando é a *Inclinação*, que é o ângulo que a superfície faz com a horizontal. Este *input* vai influenciar o valor do cálculo da quantidade da chuva incidente e as cargas de radiação incidente na superfície. O valor desta inclinação pode variar entre 0° (pavimento ou cobertura plana) e 90° (parede vertical).

- O último comando é a *Altura do edifício/ Coeficientes de chuva incidente*. Aqui o programa dispõe de dois métodos, um sem designação corrente e o outro é ASHRAE Standard 160P [2]. Para a presente dissertação apenas será usado o primeiro, onde se utiliza uma expressão que tem em conta os parâmetros: quantidade da chuva, *coeficientes de chuva incidente* e a velocidade do vento.

$$\text{Quantidade de chuva incidente} = \text{Quantidade da chuva} \cdot (R1 + R2 \cdot \text{veloc. do vento}) \quad (4-1)$$

A quantidade da chuva [l/m²h] e a velocidade do vento<sup>17</sup> [m/s] são valores que o programa vai ler ao ficheiro climático. Os coeficientes R1 e R2 servem para estimar a

---

<sup>17</sup> Este valor é a velocidade média do vento em m/s, medido para uma altura de 10 metros, em área aberta para uma dada orientação.

*quantidade de chuva incidente* [ $\text{l/m}^2\text{h}$ ] numa superfície para uma dada orientação e inclinação, estando dependentes da geometria e da localização da mesma. Os valores de R1 estão apenas relacionados com a inclinação da superfície [vd. Anexo A - Tabela 3].

Os valores do coeficiente R2 exprimem a exposição da superfície exterior da solução construtiva à quantidade da chuva. Esta exposição permite ter em conta a presença de edifícios vizinhos, de vegetação, ou outro tipo de elementos; R2 pode variar entre 0 e 0,2. Os valores estão descritos no Anexo A - Tabela 4.

### 4.2.3. Coeficientes de transferência de superfície

O ar junto às superfícies das paredes exteriores do edifício actua como uma camada de ar estagnante. Assim, os fluxos de calor e humidade que atravessam a envolvente sofrem uma resistência à sua passagem, a chamada *resistência térmica superficial* [vd. 4.2.3.1.1].

Os *coeficientes de transferência de superfície* indicam em que medida as condições do ambiente afectam o valor dos fluxos de calor e humidade que atravessa as superfícies da envolvente de construção. Seguidamente serão apresentados estes coeficientes.

#### 4.2.3.1. Superfície exterior

##### 4.2.3.1.1. Resistência térmica superficial [ $\text{m}^2 \text{K} / \text{W}$ ]

A *resistência térmica superficial* [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] é o inverso da *condutância térmica superficial* -  $h$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]). Esta é regida pela convecção e trocas de calor por radiação entre a superfície e o ambiente circundante.

Para a *condutância térmica superficial* em paredes exteriores pode-se optar por escolher entre um valor constante de  $0,0588 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$  (o que é suficiente na maioria dos casos) [62] e um valor dependente do vento. Se a opção "*wind-dependent*" estiver activada, o WUFI determina a *condutância térmica superficial* dependendo do formato do ficheiro climático seleccionado, que para Lisboa é o formato DAT [vd. 4.4]. O valor da *condutância térmica superficial* ( $h$ ) depende das variáveis inclinação da superfície e velocidade do vento. Se a inclinação (inserida no menu *Orientação/ Inclinação*) for maior que  $10^\circ$  e a superfície estiver oposta à direcção que sopra o vento (condições de sotavento), o valor de  $h$  é dado por:

$$h = 0.33 \cdot \text{Velocidade vento} + 4.5 + 6.5 \quad (4-2)$$

Caso a superfície esteja na direcção que sopra o vento, então:

$$h = 1.6 \cdot \text{Velocidade vento} + 4.5 + 6.5 \quad (4-3)$$

O valor 4.5 W/m<sup>2</sup>K é relativo à *condutância térmica superficial* por convecção, para velocidade do vento igual 0 m/s e o valor 6.5 W/m<sup>2</sup>K é a componente correspondente à radiação.

No gráfico da fig. 9 é possível visualizar a relação entre a *condutância térmica superficial* e a velocidade do vento. Como já seria de esperar (pelas equações acima), quanto maior a velocidade do vento, maior será a *condutância térmica superficial*. O facto de ser a favor ou contra a direcção do vento também influencia. E como se pode observar, o valor do coeficiente é maior quando está na direcção do vento (Luv) do que quando está contra (Lee).

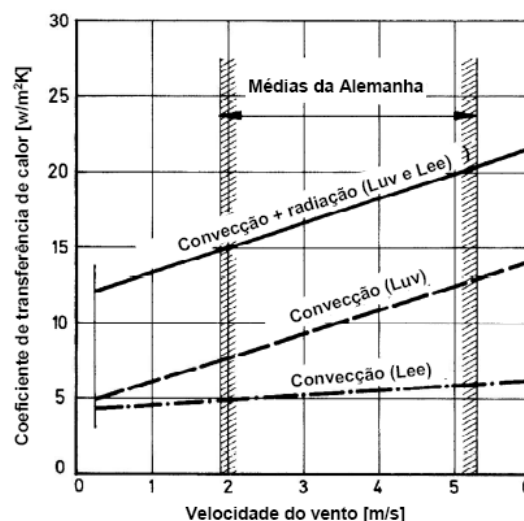


fig. 9 – Relação entre a *condutância térmica superficial* e a velocidade do vento [7]

Seguidamente serão alvo de análise os fenómenos que originam esta resistência, causando uma redução no fluxo de calor.

### ***Condutância térmica superficial (h):***

Se uma superfície está mais quente que o ambiente envolvente, ocorrerá transferência de calor. Esta transferência é efectuada por diversos mecanismos: condução de calor através do ar adjacente à superfície, transporte convectivo de fluxos aéreos e emissão de radiação de onda longa. A modelação detalhada de todos estes fenómenos é extremamente complexa, mas não necessária no contexto da física das construções [62], dado que para a relação entre

temperatura e o fluxo de calor pode definir-se uma proporcionalidade simples com um coeficiente constante:

$$q = (h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}) \cdot \Delta T = h_{\text{ext}} \times \Delta T \quad (4-4)$$

em que:

$q$  [W/m<sup>2</sup>]: intensidade do fluxo de calor

$h_{\text{ext}}$  [W/m<sup>2</sup>K]: *condutância térmica superficial* exterior

$\Delta T$  [°C]: diferença entre a temperatura ambiente e a da superfície

$h_{\text{conv}}$  [W/m<sup>2</sup>K]: *condutância térmica superficial* exterior por convecção

$h_{\text{rad}}$  [W/m<sup>2</sup>K]: *condutância térmica superficial* exterior por radiação

Como se pode verificar, a *condutância térmica superficial* resulta da soma das componentes relativas às trocas térmicas por radiação e por convecção [11].

#### ***Condutância térmica superficial por convecção* ( $h_{\text{conv}}$ )**

O ar adjacente à superfície transporta o calor da superfície por condução e convecção. Embora sejam dois fenómenos de transporte distintos, usualmente são agrupados no termo de “*transferência de calor convectivo*”. Numa posição próxima da parede, o ar assume a temperatura da superfície da parede, não existindo uma distribuição de temperatura constante. Mas a uma certa distância da superfície, a mistura de convecção do ar já mantém a distribuição de temperatura quase constante. À zona entre a superfície da parede e o ponto em que a temperatura assume uma distribuição constante chama-se camada limite [30]. Ao ponto onde a temperatura começa a ter uma distribuição constante chama-se camada limite térmica.

A transferência de calor da superfície da parede para o ar adjacente não é determinada pela diferença entre a temperatura da superfície e da temperatura do ar ambiente, mas por uma diferença menor entre a temperatura da superfície e a temperatura da camada limite térmica. Portanto, o fluxo de calor tem um valor menor do que seria esperado se fosse calculado a partir da temperatura do ar ambiente (nesta situação a resistência térmica superficial seria nula). Esta redução do fluxo de calor é formalmente designada pela introdução de uma “*resistência térmica superficial por convecção*” que é o inverso da *condutância térmica superficial por convecção*  $h_{\text{conv}}$  [W/m<sup>2</sup>K], indicada na equação 4-4. O valor numérico da *condutância térmica superficial por convecção* ( $h_{\text{conv}}$ ) é uma grandeza com uma elevada complexidade de cálculo, pois esta depende de uma série de factores: da temperatura, da

direcção e propriedades do fluxo de ar, e da rugosidade e geometria da superfície da parede [30].

### ***Condutância térmica superficial por radiação ( $h_{\text{rad}}$ )***

A superfície da parede tem sempre trocas de radiação térmica por onda longa com outras superfícies circundantes. O fluxo de calor correspondente depende da temperatura (à quarta potência), dos materiais, da natureza das superfícies, do tamanho e da disposição geométrica das superfícies envolvidas [30]. Como na maioria dos casos as temperaturas das outras superfícies não são conhecidas, para efeitos de cálculos de Física das Construções de um edifício, assume-se, em condições gerais, que sejam idênticas à temperatura do ar ambiente, que é conhecido. Pode-se então concluir que existe uma dependência da *condutância térmica superficial por radiação*, com a temperatura do ar ambiente. A dependência do material da parede e da natureza da superfície é desprezível, se os materiais forem não-metálicos [63], que é o caso da maioria das superfícies dos edifícios em Portugal. Como nota, referir que a *condutância térmica superficial por radiação* se aplica apenas a troca de radiação entre superfícies que estão mais ou menos à temperatura ambiente. No que refere à radiação solar (com a temperatura na fonte de 6000 K), esta é tratada separadamente [vd.4.2.3.1.3], não entrando nos cálculos das trocas de radiação por onda-longa.

#### ***4.2.3.1.2. Espessura da camada de ar de difusão equivalente - $S_d$ [m]***

Nos casos onde estão presentes camadas muito finas colocadas superficialmente na parede exterior (caso de uma demão de tinta, papel de parede, barreira pára-vapor, entre outros), só há necessidade de serem consideradas no cálculo higrotérmico se provocarem uma resistência considerável à difusão de vapor de água. Assim, é útil que o programa disponha do parâmetro  $S_d$  [vd.3.3.6], que permite ter em conta a resistência à difusão de vapor de água sem haver a necessidade de incluir no menu *Elemento Construtivo* [vd.4.2.1] a camada muito fina referente ao revestimento de superfície.

A resistência da superfície à transferência de vapor de água é resultante da camada de ar limite [30] existente junto à superfície da envolvente e é descrita pelo *coeficiente de transferência de vapor de água*. Esta resistência é automaticamente calculada pelo WUFI e não é necessária ser incluída no valor de  $S_d$  [62].



### ***Coefficiente de transferência de vapor de água - $\beta_p$***

A transferência de vapor de água pode ser descrita por analogia com a transferência de calor:

$$g_v = \beta_p \cdot (p_a - p_s) \quad (4-5)$$

em que:

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] : densidade do fluxo de vapor de água

$\beta_p$  [kg/m<sup>2</sup>sPa]: coeficiente de transferência de vapor de água (Permeância)

$p_a$  [Pa]: pressão parcial de vapor de água ambiente

$p_s$  [Pa]: pressão parcial de vapor de água na superfície

Quando  $g_v$  toma um valor positivo, o vector normal à superfície que o representa tem o sentido para o exterior da construção. Se é negativo tem o sentido para o interior [11].

A razão para a existência de uma resistência que afecta a transferência de vapor de água na superfície é a mesma que a resistência criada para a transferência de calor (que é traduzida pela *resistência térmica superficial* [vd.4.2.3.1.1]), ou seja, o efeito de uma camada de ar estática junto à superfície da parede.

Uma vez que as condições ambientais afectam ambas as camadas limite de ar de forma análoga, existem relações de similaridade entre a difusão de vapor de água e a transferência de calor (por convecção), de modo que o coeficiente de transferência de vapor de água ( $\beta_p$ ) pode ser obtido a partir da equação:

$$\beta_p = 7 \cdot 10^{-9} \cdot h_{\text{conv}} \quad (4-6)$$

em que:

$h_{\text{conv}}$  [W/m<sup>2</sup>K]: *condutância térmica superficial* exterior por convecção

As relações de similaridade entre a difusão de vapor de água e a transferência de calor por convecção fazem com que o coeficiente de transferência de vapor de água ( $\beta_p$ ) também seja dependente da velocidade do vento.

#### ***4.2.3.1.3. Absorção de radiação por onda-curta [-]***

Esta grandeza determina a fracção da radiação solar incidente por onda curta (ou seja, da resultante da radiação solar directa, difusa e reflectida pelo solo) que é absorvida pela superfície da envolvente. Este coeficiente não contabiliza as trocas de radiação de onda longa

com outras superfícies adjacentes, pois estas já foram contabilizadas pelo parâmetro *condutância térmica superficial por radiação* [vd.4.2.3.1.1].

Ao observar-se os valores da radiação solar constata-se uma variação acentuada diurna, não existindo uma relação com a temperatura do ar ambiente, como existe nas trocas de radiação por onda longa. Dada esta variabilidade da radiação solar, o seu efeito sobre as temperaturas da superfície não pode ser de forma alguma negligenciado, devendo ser tratado separadamente.

O *coeficiente de absorção de radiação de onda curta* ( $a_s$ ) vai influenciar o valor do fluxo de calor na superfície que absorve a radiação solar, como se vê na equação:

$$q = a_s \cdot I \quad (4-7)$$

em que:

$q$  [W/m<sup>2</sup>]: fluxo de calor devido à radiação solar

$a_s$  [-] : coeficiente de absorção de radiação de onda-curta

$I$  [W/m<sup>2</sup>]: intensidade da radiação solar vertical para a componente de superfície

Ao longo do dia, o fluxo de calor numa superfície devido à absorção de radiação por onda curta não é constante, pois a radiação solar incidente ( $I$ ) para uma dada orientação geográfica também é variável, como se pode ver no gráfico exposto seguidamente [vd.fig. 10]. A radiação solar incidente depende também da inclinação da superfície que recebe a radiação, que à partida será sempre constante e no caso de paredes verticais a inclinação é de 90°.

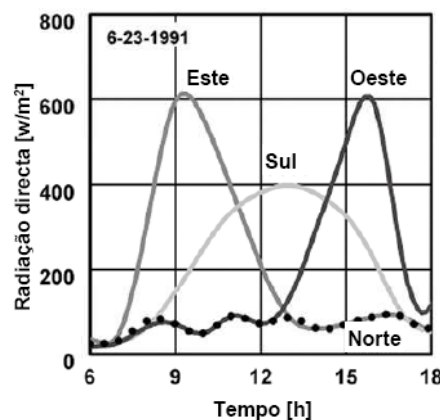


fig. 10 - Variação da radiação solar incidente e o tempo [7]

No Anexo A - Tabela 5 apresentam-se alguns valores disponibilizados pelo WUFI para o coeficiente  $a_s$ , para diferentes materiais com diferentes cores.

#### 4.2.3.1.4. *Emissividade [-]*

Este parâmetro é especialmente importante para a situação de análise do fenómeno de *overcooling* [vd.6.3.3.2.3], podendo-se optar por um valor padrão (que o WUFI disponibiliza para cada material aplicado na superfície exterior), ou o utilizador tem a possibilidade de colocar um valor redefinido. A absorção de radiação por onda longa é importante na definição das trocas de radiação por onda longa que a superfície tem com a atmosfera e a superfície terrestre. Porém, é desejável que o ficheiro climático contenha os dados das trocas de radiação de onda longa ao longo do período de simulação [62].

#### 4.2.3.1.5. *Factor de redução da chuva incidente*

O *factor de redução da chuva incidente* não depende do tipo de material da parede, depende apenas da rugosidade e inclinação da superfície [vd.4.2.2] e da natureza da precipitação (se é chuva ou neve). No fundo, este apenas expressa o facto de alguma água da chuva quando embate na parede não ficar em contacto com a mesma, não estando nesta situação disponível para absorção (para acção capilar do material) [vd.3.3.2].

Este factor tem o valor de um para superfícies horizontais, ou seja, assume-se que toda a água que embate na superfície fica disponível para absorção. Para superfícies verticais, assume valores perto de zero, caso a precipitação seja na forma de neve ou granizo e deve ser estimado para outras condições. No entanto, o valor de 0,7 é frequentemente utilizado, sendo recomendado por *Künzel* [46]. O *factor de redução da chuva incidente* é igual a zero, para situações em que se considere que não existe qualquer tipo de absorção.

### 4.2.3.2. *Superfície interior*

#### 4.2.3.2.1. *Resistência térmica superficial [ $m^2K/W$ ]*

A *resistência térmica superficial* [ $m^2K/W$ ] tem o mesmo significado que no caso da superfície exterior, normalmente apresenta é um valor superior (0,13  $m^2K/W$ ). A razão para tal prende-se com o facto de esta ser o inverso da *condutância térmica superficial* [ $W/m^2K$ ], que aqui assume um valor menor, uma vez que a velocidade do vento no interior é significativamente menor que no exterior, logo as trocas por convecção junto à superfície são muito menores. Desta forma, o efeito das trocas de calor por radiação entre a superfície e o

ambiente circundante (radiação de onda longa) têm um maior peso no valor da *condutância térmica superficial*, comparativamente ao peso que tem no caso da superfície exterior.

#### 4.2.3.2.2. Espessura da camada de ar de difusão equivalente - $S_d$ [m]

Como acontece para a *resistência térmica superficial*, o factor  $S_d$  tem o mesmo significado que no caso da superfície exterior. Assim, o programa trata-o da mesma forma na superfície interior e exterior [vd.4.2.3.1.2].

### 4.2.4. Condições Iniciais

Neste menu especificam-se as condições iniciais em termos de temperatura e teor de água para a solução construtiva a ser utilizada na simulação higrotérmica. O teor de água inicial é particularmente importante pois o seu valor está fortemente relacionado com a duração temporal que o elemento levará a secar<sup>18</sup>.

O valor do teor de água inicial depende de uma série de circunstâncias individuais, tais como a quantidade de água na produção do material (p.e., para um tijolo cerâmico), o valor da mistura de água (é diferente de um betão para uma argamassa), a *quantidade de chuva incidente* na parede enquanto está desprotegida, ou seja, enquanto não é aplicado qualquer revestimento exterior e da altura do ano em que foi realizada a construção (Verão/ Inverno), entre outros factores. Desta forma, não existe nenhum critério específico que se adequa às várias situações. No Anexo A - Tabela 6 apresentam-se exemplos de valores típicos de humidade inicial usados pelo WUFI.

No que refere ao teor de água, existem três possíveis opções. A primeira é a adopção de valor constante de humidade relativa ao longo da secção transversal (*Constant Across Component*). Para converter a humidade relativa em teor de água do material, é necessário recorrer à *Curva de armazenamento de humidade* [vd.3.3.1]. Desta forma, resultam valores de teor de água iniciais diferentes para as várias camadas, caso estas não sejam de materiais iguais. Se a opção for definir o teor de humidade para cada camada (opção *In each layer*), para cada uma delas pode atribuir-se um valor *Build-In Moisture*. Este é o *valor típico da humidade de construção* (em kg/m<sup>3</sup>) e reflecte a humidade que os materiais apresentam inicialmente. Atendendo aos valores de teor de água com que cada material fica depois de seleccionada esta opção, constata-se que são valores muito elevados comparativamente aos

---

<sup>18</sup> Considera-se que um elemento construtivo está seco, se após um período em que ocorre a secagem (redução do teor de água), a diferença entre o teor de água numa estação do ano e o teor de água para a mesma estação no ano seguinte, não for significativa.

valores que advêm da escolha pela opção *Constant Across Component*. Esta situação prende-se com o facto do valor *Build-In Moisture* estar associado ao início de ocorrência de degradação do material, na medida em que o WUFI assegura que após a simulação, se teor de água do material ficar abaixo deste valor, o material não apresentará qualquer tipo de degradação. Existe ainda uma terceira opção, que consiste em definir o teor de água a partir de um ficheiro externo, ou seja, que não está na base de dados do programa. Este é especialmente interessante quando se pretende usar *outputs* obtidos noutras simulações higrotérmicas [vd.7.2.3.2].

Para a distribuição inicial de temperatura existem duas opções semelhantes às existentes para a especificação do teor de água inicial. A primeira é definir um valor constante de temperatura ao longo da secção transversal e a segunda consiste na utilização de um ficheiro que descreve o valor de temperatura para cada posição geométrica da secção transversal da parede [vd.7.2.3.2].

## 4.3. Controle

### 4.3.1. Período de Simulação/ Profiles

Neste menu é inserido o início e o fim do período de simulação. Além disso também é definido o *time step*<sup>19</sup> [h] que se pretende usar no cálculo da simulação higrotérmica.

### 4.3.2. Numérico

Neste menu existem várias opções relevantes no cálculo da simulação higrotérmica, nomeadamente a opção de consideração ou não, da transferência de calor e do transporte de humidade. Pode-se ainda excluir do processo de cálculo: condução capilar [vd.3.3.2], calor latente de evaporação e calor latente de fusão.

A opção *enable* está relacionada com a convergência da simulação. Nesta opção é digitado um número de *steps*<sup>20</sup> e um número máximo de *stages*<sup>21</sup>. Se uma convergência falhar, é calculado novamente um *time step*, que é dividido pelo número de *steps*, sendo esta operação realizada o número de vezes que se indicou para o valor de *stages*.

---

<sup>19</sup> Tempo usado para cada iteração na simulação higrotérmica.

<sup>20</sup> Número de vezes que se divide um *time step*, caso falhe uma convergência no decorrer da simulação higrotérmica.

<sup>21</sup> Número de vezes que é feita a operação da divisão do *time step* pelo *step*.

## 4.4. Clima

### 4.4.1. Clima exterior

As superfícies externas da envolvente estão sujeitas ao ambiente exterior, sendo considerado no WUFI através de um ficheiro climático que inclui os parâmetros horários necessários para a realização das simulações higrotérmicas. Estes parâmetros são:

- temperatura de bolbo seco;
- pressão de vapor, ou qualquer outro parâmetro de humidade que possa ser usado para o cálculo da pressão de vapor;
- radiação de onda curta (global e radiação solar difusa);
- radiação de onda longa (radiação térmica do céu e radiação terrestre);
- temperatura média de radiação do ambiente circundante;
- velocidade e direcção do vento;
- pressão atmosférica;
- precipitação.

Alguns destes parâmetros variam consoante a orientação geográfica, sendo necessário introduzir a *orientação* [vd.4.2.2], para que o WUFI possa ler no ficheiro climático os valores dos parâmetros adequados.

Em Portugal apenas existe o ficheiro climático para a zona de Lisboa, mas para toda a Europa já existem 88 locais em que o WUFI disponibiliza ficheiros climáticos [7]. O WUFI ainda assim, permite a introdução de dados meteorológicos, ou seja, existe a possibilidade de criar um ficheiro climático, tendo em vista a análise detalhada de um local específico (sendo necessário para este caso uma estação meteorológica local, como existe na FEUP<sup>22</sup> [13]), ou para a realização de simulações de ensaios laboratoriais.

### 4.4.2. Clima Interior

#### 4.4.2.1. Introdução

O clima interior no programa WUFI é definido graficamente do lado direito da solução construtiva [vd.fig. 11] e está dependente do clima exterior, do comportamento dos ocupantes e por último dos sistemas de aquecimento, arrefecimento e ventilação. O WUFI permite

---

<sup>22</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

quatro formas de definição do clima interior: Curvas Sinusoidais e as normas EN13788 [12], EN15026 [11] e ASHRAE160 [2]. No âmbito desta dissertação não será utilizada a norma ASHRAE160, pelo que os sistemas de climatização não serão analisados.

As formas referidas anteriormente são apenas utilizadas para a definição do clima interior, ou seja, no caso da EN17888 que tem um procedimento para o cálculo da temperatura e pressão parcial de vapor de água ao longo da secção construtiva, apenas a parte da norma referente à definição do ambiente interior será usada. Nos próximos subcapítulos serão apresentadas cada uma destas normas, que permitem a definição do clima interior.

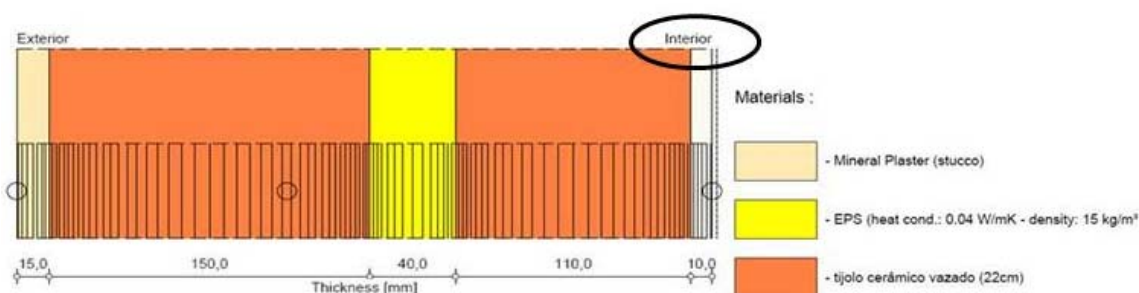


fig. 11 - Posição do clima interior no Wufi

#### 4.4.2.2. Curvas Sinusoidais

A opção “*Sine Curves*” só deve ser utilizada em casos que é possível ignorar flutuações de curto prazo das condições de fronteira e apenas considerar as tendências de longo prazo (por exemplo, anual), isto é, utilizar somente valores médios, desprezando os picos que possam ocorrer. Contudo, apenas se pode optar por esta abordagem se a variabilidade das quantidades, temperatura e humidade relativa não desempenharem um papel influente. Nesta situação, a temperatura e a humidade relativa podem ser modeladas por simples curvas sinusoidais com período anual ou até admitir-se valores constantes. Estas condições são normalmente exibidas para o ambiente interior, nos casos em que a solução construtiva tem uma forte capacidade de armazenamento de calor e humidade, o que faz com que variações diárias da temperatura e humidade exterior sejam fortemente atenuadas pela solução construtiva da parede exterior.

No que respeita à temperatura, o WUFI pede a introdução de um valor médio, de uma amplitude e do dia em que se atinge o valor máximo. Com estes dados constrói a curva seno. O mesmo procedimento é usado na variável humidade relativa.

#### **4.4.2.3. Norma EN 13788**

A opção “EN 13788” é utilizada para definir apenas o clima interior, a partir de um clima exterior, seguindo determinados pressupostos que estão presentes na norma EN13788 [12]. A norma estabelece que a temperatura permanece constante ao longo do período anual. Já a humidade relativa tem um valor variável, pois depende da temperatura e da humidade absoluta do ar interior, que não é constante. A humidade absoluta é calculada por:

$$N_i = N_a + \delta N \quad (4-8)$$

em que:

$N_i$ : humidade absoluta do interior;

$N_a$ : humidade absoluta do exterior;

$\delta N$ : variação de humidade, depende do  $\theta_a$  e classe de humidade\* (Anexo A da ISO 13788) [12];

\* São definidas pela norma, em função do tipo de ocupação/função que apresenta o edifício,

$N_a = \varphi_a \cdot$  Humidade absoluta de saturação ( $\theta_a$ );

$\theta_a$ : valor médio mensal da temperatura exterior;

$\varphi_a$ : valor médio mensal da humidade relativa exterior;

#### **4.4.2.4. Norma EN15026**

A Norma EN 15026 é usada nas simulações higrótérmicas no cálculo da transferência de calor e transporte de humidade ao longo das várias camadas definidas na solução construtiva da envolvente do edifício.

No que refere às condições de ambiente interno, na ausência de valores medidos ou simulados, é feita uma abordagem simplificada da determinação da temperatura e humidade interna para edifícios habitacionais ou escritórios (edifícios aquecidos), através da temperatura exterior. A temperatura para o ar interno é resultante do valor da média diária da temperatura exterior, como exemplificado no Anexo A - fig. 1. Para a humidade interna é necessário ainda seleccionar uma classe, de acordo com o tipo de ocupação do edifício.



## 4.5. Outputs

### 4.5.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os vários formatos (tabelas/gráficos) de *outputs* que serão utilizados para efectuar as análises às simulações higrotérmicas.

### 4.5.2. *Quick Graph* – Temperatura da superfície/ Temperatura de ponto de orvalho

Neste gráfico pode visualizar-se, para qualquer posição de monitorização [vd.4.2.1] a temperatura e a respectiva temperatura do ponto de orvalho<sup>23</sup>. Quando a temperatura do ponto de orvalho é superior à temperatura numa dada posição geométrica da parede, existe risco de condensações nessa posição. Para esta situação a humidade relativa assume um valor de 100%. Existe então uma relação entre os gráficos Temperatura/Temperatura do ponto de orvalho e Temperatura/Humidade Relativa. Em ambos é possível avaliar o risco de ocorrência de condensações.

Tabela 2 - Relação entre Temperatura de orvalho e HR e entre HR e risco de ocorrência de condensações

	HR (%)	Ocorrência de condensações / degradação
Temperatura < Temperatura de orvalho	RH=100	Existe condensações e degradação
Temperatura = Temperatura de orvalho	RH=100	Existe condensações e degradação
Temperatura > Temperatura de orvalho	RH < 100	Depende do tipo de material

O facto de a humidade relativa ser menor que 100%, não garante que não haja qualquer tipo de presença de humidade e consequentemente possíveis degradações, pois depende do tipo de material [vd.Tabela 2]. Por exemplo, para materiais higroscópicos a presença de água líquida ocorre para valores menores que 100% (basta ver a *curva de armazenamento de humidade*). Assim, existem certos casos, como a madeira, em que o crescimento de fungos pode ocorrer para valores de humidade relativa que rondem os 90% [44].

Dada esta incerteza quanto ao valor de humidade relativa para o qual começa a existir a presença de água líquida, existem determinados valores estabelecidos por normas em que se baseia a formulação do WUFI:

---

<sup>23</sup> Temperatura para a qual numa determinada massa de ar já não se verifica variação da pressão de vapor de água, atingindo-se a saturação [49].

- o teor de água numa camada de fronteira deve ser abaixo dos  $0,5\text{kg/m}^2$  [64]
- a humidade relativa na superfície interior deve permanecer abaixo dos 80%, para evitar o crescimento de fungos [12].

Apenas nas camadas de ar [vd.3.3.7] e em materiais não higroscópicos, o risco de condensação é um conceito bem claro. Neste caso, só quando a humidade relativa atinge o valor de 100% existe presença de água no estado líquido.

#### **4.5.3. Quick Graph – Monitor Positions Isopleths**

Esta funcionalidade averigua o risco de ocorrência de proliferação de fungos no paramento interior da parede exterior, através da definição de duas curvas que separam os pontos que indiciam elevado risco de ocorrência (os que estão acima das curvas) dos pontos que apontam para a não ocorrência (os que estão abaixo das curvas). As duas curvas que são definidas para estes gráficos [vd. Anexo A – fig. 3] representam diferentes tipos de materiais. A curva LIM B I representa substâncias reutilizáveis, como por exemplo papel de parede, placas de gesso cartonado e outros materiais facilmente degradáveis. A curva LIM B II representa substratos com estrutura porosa, por exemplo rebocos, materiais de construção minerais, algumas madeiras e materiais de isolamento não pertencentes ao grupo I [62].

#### **4.5.4. Quick Graph – Teor de água total e teor de água de materiais individuais**

O teor de água de camadas individuais é dado como teor de água médio por volume. O teor de água total é dado como o teor de água da parede por área. Assim resulta:

$$\sum \text{Teor de água de camadas individuais (kg/m}^3\text{)} \times \text{espessura da camada } i \text{ (m)} = \text{Teor de água total (kg/m}^2\text{)}$$

#### **4.5.5. Status of Last calculation**

Nesta opção podem visualizar-se os valores relevantes (valor máximo, mínimo, início da simulação e fim da simulação) do teor de água, o integral do fluxo de humidade [ $\text{kg/m}^2$ ] e fluxo de calor [ $\text{w/m}^2$ ] para todo o período de cálculo. A partir do integral deste último, obtém-se o somatório de toda a energia [ $\text{MJ/m}^2$ ] usada para manter as condições estabelecidas para o interior durante o período de cálculo [62]. Quanto ao sinal, se for positivo o fluxo de energia

dirige-se para o interior da construção, isto é, da esquerda para a direita (o ambiente exterior está sempre do lado esquerdo [vd.4.4.1]). Se for negativo tem o sentido inverso.

#### **4.5.6. WUFI-Filme**

Através deste *output* pode-se observar o valor do teor de água ou outra grandeza, ao longo do período de cálculo numa determinada posição da solução construtiva (o chamado *course*). Esta opção é especialmente importante nos casos onde exista o risco de anomalias devido a factores como temperaturas extremas ou excessiva humidade, pois permite analisar ao pormenor na altura problemática a evolução de uma qualquer grandeza no ponto crítico - ponto onde há risco de ocorrência de degradação. Deste modo, é possível aferir medidas mais concludentes, tendo em vista a não ocorrência de anomalias.



## 5. FICHEIRO CLIMÁTICO DE LISBOA

### 5.1. Introdução

O ficheiro climático é elaborado a partir de dados meteorológicos horários. As grandezas que constam no ficheiro são as já referidas em 4.4.1, nomeadamente: temperatura do ar exterior, humidade relativa do ar exterior, radiação solar global, chuva incidente. O valor destas ao longo do ano de referência será analisado nos próximos subcapítulos.

### 5.2. Temperatura exterior

A Temperatura exterior (expressa em °C) é uma grandeza fundamental no cálculo das simulações higrotérmicas, entrando directamente na equação de balanço de calor (equação 2-2) e indirectamente na equação de equilíbrio de humidade (equação 2-1).

Ao observar-se o gráfico da fig. 12 destaca-se a grande variabilidade da grandeza ao longo de cada dia, especialmente na passagem do dia para a noite, facto que é acompanhado com o desaparecimento da radiação solar.

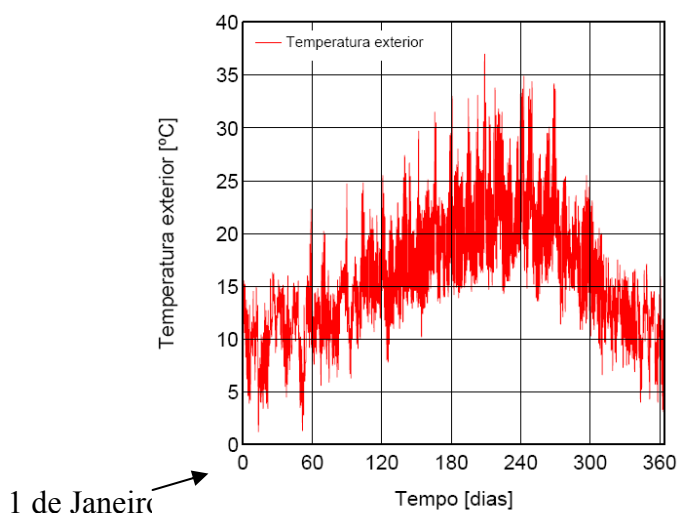


fig. 12 – Temperatura exterior diária do ano de referência para a zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI)

### 5.3. Humidade relativa exterior

A humidade relativa exterior (expressa em %) é uma grandeza fundamental no cálculo das simulações higrotérmicas, presente na equação de balanço de humidade (equação 2-1).

O gráfico da fig. 13 evidencia a grande variabilidade desta grandeza ao longo de cada dia. De uma forma geral, verifica-se que em termos médios para a estação de Inverno existem valores de humidade relativa exteriores maiores.

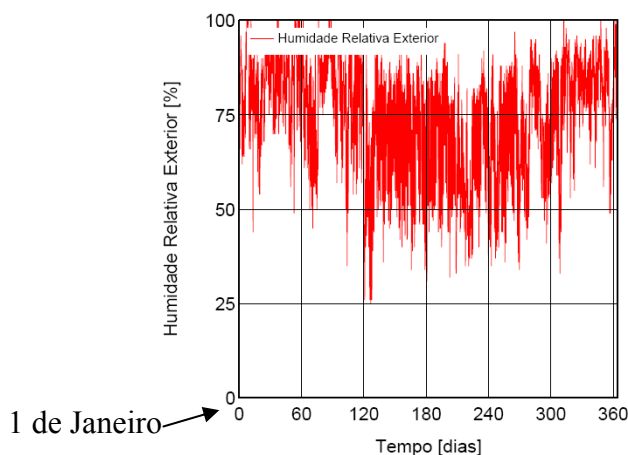


fig. 13 – HR exterior diária do ano de referência para a zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI)

## 5.4. Radiação global

A radiação solar é uma grandeza do clima exterior que servirá como *input* para as várias simulações higrotérmicas que serão apresentadas ao longo deste trabalho. Esta grandeza é expressa  $W/m^2$ , variando conforme a orientação.

Ao visualizar-se o gráfico da radiação solar global para a orientação Sul [vd.fig. 14], constata-se que o máximo valor da radiação solar global acontece para a estação de Outono e Inverno, mais precisamente entre Novembro e Fevereiro. Os valores mais baixos ocorrem entre Maio e Julho. Este gráfico mostra que o registo do valor máximo de radiação solar não ocorre no mesmo período temporal que os valores máximos de temperatura exterior [vd.fig. 12], como seria de esperar numa primeira perspectiva.

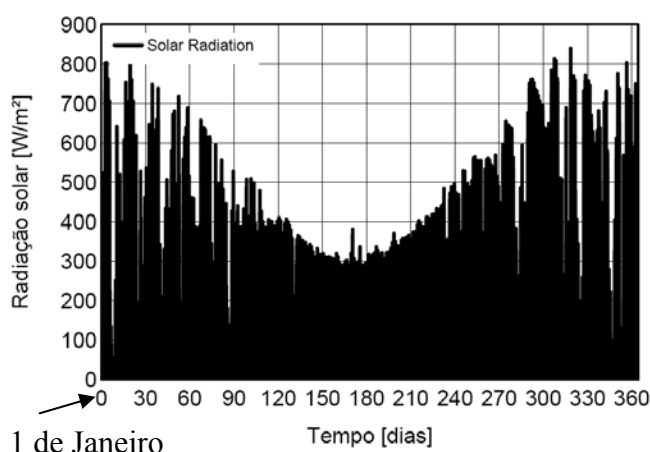


fig. 14 - Radiação Solar Global anual para a orientação Sul na zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI)

No gráfico da radiação solar para a orientação Este [vd.fig. 15] não existe uma discrepância tão grande dos valores de radiação médios mensais ao longo do ano, como existe para a orientação Sul. Contudo, é nos meses de Verão que se registam os maiores valores, sendo desta forma o inverso do que acontece para a orientação Sul.

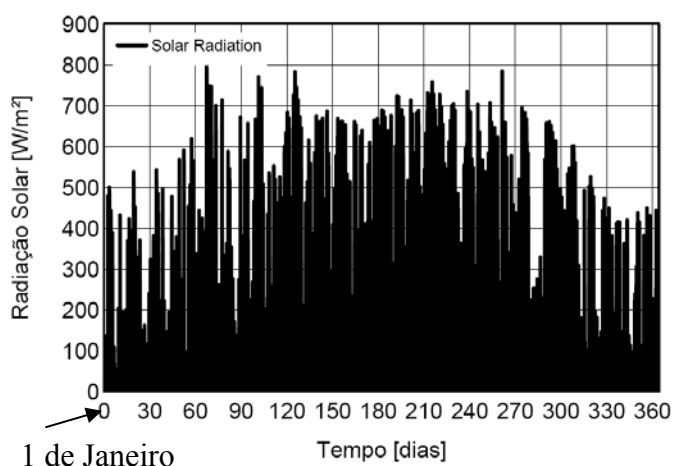


fig. 15 - Radiação Solar Global anual para a orientação Este na zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI)

A evolução dos valores de radiação para a orientação Norte [vd.fig. 16] é semelhante à evolução dos valores do gráfico para a orientação Este, apenas os valores são de menor magnitude, em média sensivelmente três vezes menores.

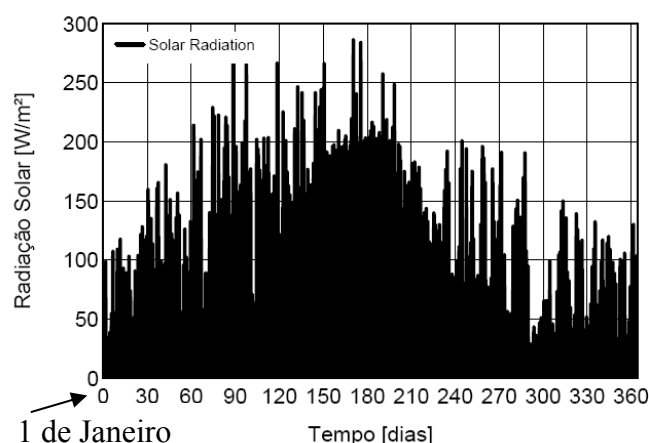


fig. 16 - Radiação Solar Global anual para a orientação Norte na zona de Lisboa (gráfico obtido a partir do ficheiro climático de Lisboa do programa WUFI)

O último gráfico alusivo à radiação solar global mostra as médias horárias ao longo dos dias de cada estação [vd.fig. 17]. Neste gráfico é possível observar que os maiores valores se registam na estação de Verão, facto expectável atendendo aos gráficos anteriores.

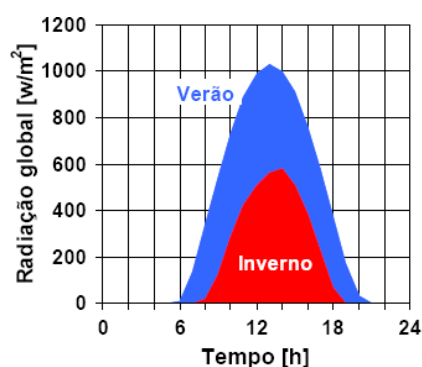


fig. 17 – Radiação global horária média para os meses de Verão e Inverno [7]

## 5.5. Chuva incidente

A chuva incidente para cada orientação é calculada a partir do valor da precipitação (*quantidade de chuva vertical*), que é igual para todas as orientações. É uma grandeza do clima exterior que também servirá como *input* para as várias simulações higrotérmicas. É expressa em  $l/m^2h$ , variando também conforme a orientação, como se pode ver na fig. 18.



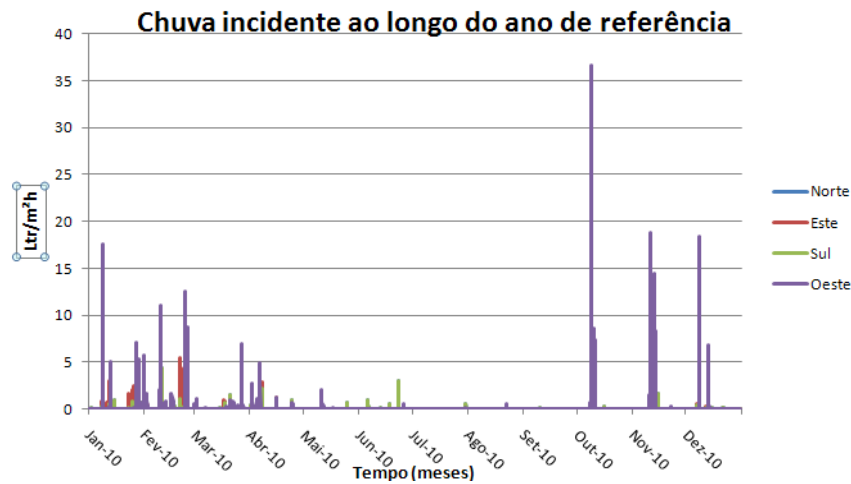


fig. 18 – Chuva incidente [ $\text{l/m}^2\text{h}$ ] ao longo do ano de referência, para as variadas orientações geográficas (valores retirados do ficheiro climático de Lisboa)

Da visualização do gráfico acima [vd.fig. 18], verifica-se que os valores máximos de chuva incidente se registam para as orientações, Oeste e Sul, mais concretamente para Sudoeste, como se pode observar pelo diagrama em baixo [vd.fig. 19]. Este diagrama de chuva incidente retirado do programa WUFI está de acordo com o índice de chuva incidente por azimuth [30].

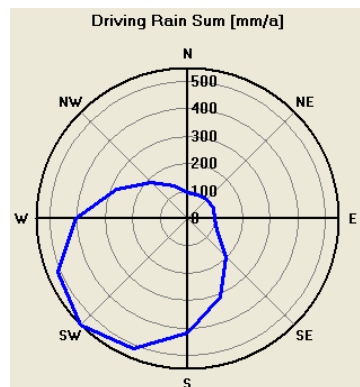


fig. 19 - Diagrama da chuva incidente para o ficheiro climático de Lisboa [Programa WUFI]



## **6. ANÁLISE DOS PARAMENTOS INTERIOR E EXTERIOR**

### **6.1. Introdução**

As superfícies da envolvente dos edifícios, ao apresentarem-se como fronteiras dos ambientes exterior e interior entre os quais ocorrem fenómenos de transferência de calor e humidade, constituem os primeiros elementos que condicionam esses fenómenos. Por este motivo devem ser objecto de concepção cuidada, tanto a nível de projecto como de operações de reabilitação.

Em fase de projecto às superfícies exteriores é atribuída a função de primeira barreira às acções higrotérmicas, dada a sua exposição à intempérie.

Neste capítulo é feita uma análise da forma como as superfícies dos paramentos interior e exterior podem condicionar o desempenho higrotérmico dos edifícios, tanto no que toca aos fenómenos que envolvem o ambiente exterior, como aos que resultam da interacção com o ambiente interior.

### **6.2. Comportamento higrotérmico do paramento interior da parede exterior face às condições de fronteira e solução construtiva**

#### **6.2.1. Introdução**

Os problemas provenientes da humidade em edifícios têm sido abordados pelos especialistas desde o início do século passado. A avaliação de risco de ocorrência de condensações internas e superficiais pode beneficiar com a utilização de modelos de simulação numérica [23].

A ocorrência de condensações em elementos construtivos depende da sua constituição, das condições climáticas existentes e dos mecanismos de comportamento do ar húmido. Este comportamento depende da temperatura e da quantidade de vapor de água que o ar húmido contém (humidade absoluta).

#### **6.2.2. Comparação entre o método Glaser e o método seguido pelo WUFI**

Os modelos higrotérmicos que assentam em modelos numéricos utilizados para a análise de condensações internas e superficiais em elementos construtivos podem realizar os cálculos em regime variável ou em regime permanente [15].

Neste subcapítulo é feita a análise comparativa das potencialidades de dois métodos de simulação de complexidade diferente: o método seguido pelo WUFI 4.2, que faz uma análise em regime variável e o método de Glaser, que faz uma análise em regime permanente.

O modelo utilizado pelo WUFI 4.2 baseia-se na norma EN 15026 [11] e tem em conta o armazenamento de calor e humidade [vd.3.3.1], os efeitos do calor latente, o transporte por convecção, transporte de água líquida [vd.3.3.2], condições de fronteira precisas (valor médios horários e não mensais) e condições iniciais [vd.4.2.4]. Assim, para se proceder à simulação do risco de ocorrência de condensações internas, é necessário introduzir um conjunto de propriedades higrotérmicas para cada material (mencionadas em 2.4).

O método Glaser é o modelo preconizado pela norma EN ISO 13788 [12], considerando apenas o estado estacionário de condução de calor e difusão de vapor de água. Desta forma, tem como desvantagem apenas permitir calcular a temperatura, a pressão de vapor parcial e a pressão de saturação em cada interface de um elemento construtivo, para cada período mensal. Este método simplifica o processo físico de transporte de humidade e transferência de calor, ao assumir que:

- A condutibilidade térmica é independente da humidade do material;
- Não ocorre absorção por capilaridade nem transporte líquido;
- Não existe transferência de calor e transporte de humidade por convecção;
- A transferência de calor é unidireccional;
- As condições de fronteiras resultam de médias mensais;
- Não são consideradas a radiação solar nem a precipitação.

As propriedades dos materiais necessárias à simulação do risco de condensações internas e da sua evaporação em elementos de construção são a condutibilidade térmica e o factor de resistência à difusão de vapor ( $\mu$ ) (apenas duas do conjunto de propriedades utilizadas pelo WUFI) [23]. Outra desvantagem do método de Glaser é que trabalha com valores médios mensais para a definição das condições de fronteira, no entanto para efeitos de dimensionamento valores horários são necessários [21]. Esta situação prende-se com o facto de os valores médios resultantes de um mês poderem não dar a origem a condensações, mas valores extremos que ocorrem durante o mês poderem resultar em condições propícias à ocorrência de condensações.

### **6.2.3. Condensações internas na parede exterior**

#### **6.2.3.1. Introdução**

A ocorrência de condensações internas dá origem ao aparecimento não programado de água líquida no interior dos elementos construtivos, podendo resultar no desenvolvimento de diversas formas de degradação de gravidade variável [15]. Tendo em vista a análise destes fenómenos, fez-se a avaliação comparativa de soluções construtivas correntes de paredes exteriores de edifícios, avaliou-se as condições de fronteira (clima exterior e interior) e ainda a importância de certas propriedades dos materiais nesta análise do risco de ocorrência de condensações internas.

#### **6.2.3.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica**

No Anexo B - Tabela 2 estão os dados de entrada usados na simulação higrotérmica do caso inicial. A solução é composta por uma parede de pano simples de alvenaria cerâmica, rebocada dos dois lados por ligantes minerais. Para a realização desta simulação, é importante destacar as condições iniciais definidas para a totalidade da solução construtiva:

-HR= 80%

-T= 20°C

O período de simulação é de dois anos.

#### **6.2.3.3. Análise de Resultados da evolução da Humidade Relativa ao longo da secção transversal da parede exterior**

O objectivo deste subcapítulo é averiguar se existem casos em que estejam reunidas condições para ocorrência de condensações internas. Há um caso inicial, que servirá de comparação para os casos seguintes, onde serão feitas alterações.

- Alteração ao nível da solução construtiva (Posicionamento do Isolante Térmico):

Neste tópico irá ser alterada a solução construtiva em relação ao caso inicial. A alteração é a introdução de uma camada de isolamento térmico XPS<sup>24</sup> de quatro centímetros. Esta camada será colocada em diferentes posições (exterior, entre os panos de alvenaria e interior), para se poder apurar de uma forma abrangente os efeitos que a introdução de uma camada de isolante térmico tem no valor da humidade relativa ao longo da solução construtiva.

---

<sup>24</sup> Poliestireno extrudido

No Anexo C – fig. 1 apresentam-se os gráficos com os valores de humidade relativa ao longo da secção transversal da parede, para os casos referidos anteriormente. Ao observarem-se estes gráficos, verifica-se que os valores médios mais baixos de humidade relativa ocorrem para a solução construtiva de isolamento térmico exterior. Já os valores mais altos ocorrem para a solução construtiva com isolamento térmico pelo interior. A razão para esta ocorrência é devido aos valores de temperatura que o pano de alvenaria apresenta em cada caso. Para o caso do isolamento térmico pelo exterior, o valor médio da temperatura para o pano de alvenaria é mais elevado. Como a humidade relativa varia inversamente com a temperatura [29], é natural que nesta situação existam valores de humidade relativa mais baixos. Outro pormenor que se destaca é as diferentes flutuações no valor da humidade relativa. Para a solução de isolamento térmico pelo exterior registam-se menores flutuações, pois neste caso o pano de alvenaria está sujeito a um menor gradiente de temperaturas, consequentemente existirá uma menor variação de humidade relativa.

Por vezes em paredes com sais higroscópicos, as flutuações da humidade relativa criam maior degradação do que valores de humidade relativa sempre elevados, pois não é a humidade relativa ser baixa ou elevada que provoca os danos, mas sim a variação acima ou abaixo do valor crítico<sup>25</sup>, que provoca as destrutivas sequências dissolução/ cristalização [29]. Desta forma, o facto de em nenhuma solução construtiva se atingir valores de humidade relativa de 100%, não dá a liberdade de concluir que não existirá qualquer degradação. Estando este facto em sintonia com o que está expresso na Tabela 2.

- Alteração ao nível da solução construtiva (Posicionamento da barreira pára-vapor):

Neste caso é introduzida uma barreira pára-vapor com um factor de resistência à difusão de vapor ( $\mu$ ) igual a 1500000. Esta barreira também será colocada em diferentes posições (interior e entre os panos de alvenaria), onde se irá verificar o efeito no valor da humidade relativa ao longo da secção transversal da parede.

A introdução duma barreira pára-vapor irá diminuir a densidade do fluxo de vapor de água -  $gv$  (equação 3-7) que atravessa a parede comparativamente à situação do caso inicial, em que não existe barreira. Assim, a variação da pressão parcial ao longo da secção transversal da parede é menor. Partindo do pressuposto que a pressão parcial é maior no interior (como acontece na maioria das vezes [32]), o fluxo de vapor tem o sentido do interior para o exterior. Desta forma, haverá maiores valores de pressão parcial ao longo da parede e

---

<sup>25</sup> O valor crítico é o valor de HR que faz a passagem da cristalização para dissolução (caso a HR esteja a aumentar) ou vice-versa [29].

consequentemente um acréscimo de humidade relativa. A excepção a esta situação é a colocação da barreira pára-vapor pelo interior [vd.Anexo C – fig. 2]. Neste caso, a quantidade de vapor de água existente no ambiente interior que atravessa a parede é bastante reduzida, originando desta forma uma redução da pressão parcial de vapor ao longo da parede, consequentemente há uma redução da humidade relativa.

- Alteração ao nível da solução construtiva (Solução de reabilitação / introdução de caixa de ar):

Neste caso serão analisadas duas situações, uma consiste na introdução de uma caixa-de-ar de quatro centímetros entre os panos de alvenaria e a outra será uma solução de reabilitação, onde é feita uma intervenção pelo interior, adicionando uma caixa-de-ar de dois centímetros, uma camada de isolante XPS de quatro centímetros e por último uma placa de gesso cartonado de dois centímetros.

De acordo com Aelenei e Henriques [31], numa solução de reabilitação térmica, para além da avaliação das implicações directas em termos de conforto térmico, é exigido também uma avaliação dos potenciais riscos de condensações internas. Numa intervenção pelo interior, através da adição das camadas referidas anteriormente, melhora-se a resistência térmica da solução construtiva, pelo que o conforto térmico do ambiente interior será melhorado. No entanto, o valor de  $S_d$  total [vd.3.3.6] da solução construtiva será aumentando, assim,  $g_v$  será menor, ou seja, haverá menor difusão do vapor de água que está no ambiente interno, aumentando desta forma a pressão parcial de vapor de água em cada camada, que resulta no acréscimo de humidade relativa [vd.Anexo C – fig. 3].

Na solução construtiva em que é inserida uma caixa-de-ar entre os panos de alvenaria registam-se os maiores valores de humidade relativa (superiores a 80%) [vd.Anexo C – fig. 3]. Porém, estes valores podem não se traduzir em degradações, já que para materiais não-higroscópicos a presença de água líquida é quase inexistente [vd.3.3.7], até ser atingido o limite de saturação (humidade relativa igual a 100%).

- Alterações das condições do ambiente interno:

Neste tópico pretende-se avaliar a influência das condições do ambiente interno no risco de ocorrência de condensações internas.

Num primeiro caso, diminui-se a temperatura dos 20°C para os 10°C. Esta diminuição da temperatura no ambiente interno provoca uma redução da temperatura ao longo de toda a secção transversal da parede, que tem como consequência um aumento da humidade relativa [vd. Anexo C – fig. 4], pois a redução da temperatura origina uma diminuição da pressão de saturação [30].

Num segundo caso aumentou-se a *carga de humidade absoluta interna*, que conduz a um aumento da pressão parcial de vapor de água do ambiente interno (a humidade absoluta é directamente proporcional à pressão parcial de vapor [30]), com consequente acréscimo de humidade relativa.

Os gráficos presentes no Anexo C – fig. 4 mostram que a temperatura e a humidade absoluta do ar (ou pressão parcial de vapor de água) do ambiente interno têm uma relevante influência no valor da humidade relativa da solução construtiva, dando resposta às questões levantadas no capítulo 2.2, em que se questionava qual a influência das condições do ambiente interno na origem de degradações.

#### **6.2.4. Condensações superficiais e proliferação de fungos no paramento interno**

##### **6.2.4.1. Introdução**

O desenvolvimento de fungos nos elementos construtivos é a anomalia que mais facilmente indica que a humidade relativa do ar interior é demasiado elevada.

O processo de germinação e proliferação de fungos em elementos de construção tem sido estudado por vários autores, citando-se como exemplo Hunter [36] e Sedlbauer [54]. Para o desenvolvimento de uma colónia de fungos é necessário que um conjunto de condições, designadas como factores de desenvolvimento, se reúna. Este conjunto inclui a infestação do ar com os esporos, a disponibilidade de humidade, de nutrientes e de oxigénio e condições de temperatura, alcalinidade, radiação e movimentação do ar adequadas [49]. Na fig. 20 estão alguns gráficos, que expõem a relação entre os valores dos factores de desenvolvimento e a probabilidade proliferação de fungos.



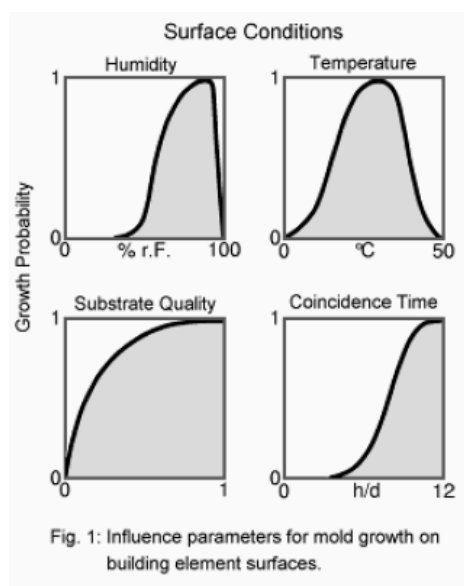


fig. 20 - Influência de determinados parâmetros na proliferação de bolores no paramento interno de uma parede [64]

No âmbito desta dissertação irão apenas estudar-se a temperatura e humidade relativa. Analisando o factor temperatura, de acordo com os estudos de Sedlbauer [54], apesar de a temperatura ideal para o desenvolvimento de fungos se situar entre os 22°C e os 35°C, os limites deste factor podem ir desde 10°C a 40°C [vd.fig. 21], dependendo da espécie e da fase de desenvolvimento. Ainda de acordo com o mesmo autor [54], verifica-se que para as espécies de fungos que se desenvolvem sobre elementos construtivos, o valor da humidade relativa deverá situar-se entre os 70% a 100%. Segundo este autor, a disponibilidade de humidade pode ser a única forma de limitar o desenvolvimento de fungos, se excluir a utilização de fungicidas. Os limites para a humidade relativa devem ser correlacionados com os limites de temperatura, de acordo com o tempo de germinação [vd.fig. 21].

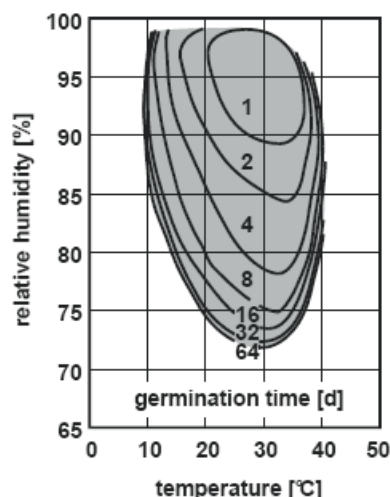


fig. 21 – Análise da temperatura e humidade relativa, tendo em conta o desenvolvimento de fungos nos paramentos interiores das paredes exteriores [33]

#### 6.2.4.2. Avaliação pela versão unidimensional

- Diferentes ambientes internos

Neste tópico analisa-se a influência do ambiente interno na proliferação de fungos. O programa WUFI dispõe de um output [vd.4.5.3] que permite ao utilizador verificar directamente se no paramento interno de uma parede existe risco de proliferação de fungos. Os dados de entrada usados nestas simulações são os que estão presentes no Anexo B – Tabela 3. De salientar a solução construtiva que é uma parede *sandwich* com um isolante térmico de quatro centímetros, sendo os revestimentos exteriores e interiores argamassas à base de ligantes minerais. Quanto às condições de ambiente interior são variáveis, ou seja, estudaram-se várias situações.

Na fig. 22 estão três casos que representam diferentes condições de ambiente interno. Para a definição do ambiente interno, recorreu-se às curvas sinusoidais [vd.4.4.2.2]. Nos três casos a temperatura assume um valor constante igual a 20°C. O valor médio da humidade relativa varia entre os 60%, 70% e 80%, consoante o caso; já a amplitude é de 5% nos três casos.

Ao observar-se a fig. 22, constata-se que apenas existe o risco de proliferação de fungos, para o caso onde a humidade relativa tem o valor de 80% (existem pontos acima da curva LIM B II [vd.4.5.3]). Nos restantes casos com temperatura de ambiente interno de 15°C [vd.Anexo C – fig. 5] e 10°C [vd.Anexo C - fig 6], com os mesmos três valores de humidade relativa, verifica-se de igual forma que apenas existe o risco de proliferação de fungos nos casos em que a humidade relativa tem o valor de 80%. Na superfície de paramentos internos

que tenham valores de humidade relativa inferiores aos 80%, independentemente da temperatura, os pontos (definidos por uma humidade relativa e uma temperatura) estão abaixo da curva LIM B II. Ao analisar a evolução desta curva, verifica-se que quanto maior a temperatura (até aos 28°C), menor poderá ser a humidade relativa, para se estar numa situação em que haja risco de proliferação de fungos. Este facto está de acordo com o gráfico exposto na fig. 21.

Face ao referido anteriormente, é normal que dentro dos casos com humidade relativa igual a 80% para a temperatura de ambiente interno igual a 10°C (a que está mais afastada da temperatura propícia à proliferação de fungos, 28°C) é onde existe menor risco de proliferação de fungos, dado o menor número de pontos que estão acima da curva LIM B II.

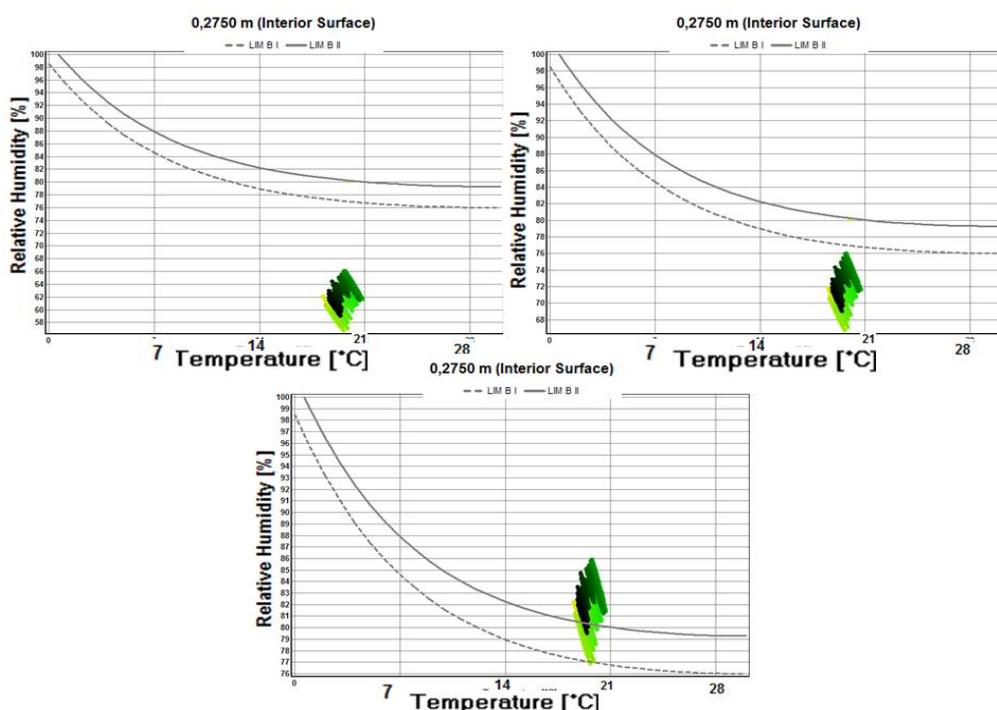


fig. 22 – Avaliação da existência de risco de proliferação de fungos para Temperatura de ambiente interno igual a 20°C e humidades relativas: 60%, 70% e 80%

#### ▪ Diferentes soluções construtivas

Neste tópico será feita a avaliação do impacto da resistência térmica da solução construtiva no risco de proliferação de fungos no paramento interior das paredes exteriores. As soluções construtivas utilizadas e o seu respectivo coeficiente de transmissão térmica (U) estão descritos na Tabela 3, assim como a verificação do cumprimento dos coeficientes de transmissão térmica de referência definidos pelo RCCTE [51] para paredes exteriores (é

considerado o caso mais gravoso que se verifica para a zona climática I<sub>3</sub>, apresentando um coeficiente de transmissão térmica de referência de valor igual a 0,5W/m<sup>2</sup>°C).

Tabela 3 – Coeficientes de transmissão térmica das soluções construtivas analisadas

Solução construtiva	U [W/m <sup>2</sup> °C]	Cumprimento do valor de U de referência <sup>26</sup>
Parede simples	1,29	Não cumpre
Parede <i>sandwich</i>	0,52	Não cumpre
Parede dupla sem Isolamento térmico	0,91	Não cumpre
Parede dupla	0,48	Cumpre

A temperatura que existe num paramento interior numa parede exterior é dependente da resistência térmica apresentada pela solução construtiva. Quanto maior a resistência térmica, maior será a temperatura superficial do paramento interno e consequentemente menor será a humidade relativa [30]. Desta forma, poderia pensar-se que sempre que um paramento interno está a uma maior temperatura, o risco de proliferação de fungos é menor. Tal facto nem sempre é correcto, devido à evolução da curva LIM B II [vd.4.5.3], em que para maiores temperaturas há maior risco de proliferação de fungos (até aos 28°C).

Ao observar-se os resultados [vd.fig. 23], verifica-se que as soluções com maiores resistências térmicas [vd.Tabela 3] que não apresentam risco de proliferação de fungos são a parede *sandwich* e parede dupla. No entanto, nota-se que a diferença nos resultados não é tão significativa como é a diferença de valores de resistência térmica entre as soluções. Por exemplo, a solução de parede simples apresenta um valor de U que é 2,5 vezes superior ao valor de U da parede dupla [vd.Tabela 3], mas no risco de proliferação de fungos que cada uma destas soluções apresenta, não há uma diferença tão significativa, pois apesar da solução de parede dupla apresentar uma maior temperatura superficial no paramento interno e consequentemente ter efeito positivo de apresentar menores valores de humidade relativa, tem também um efeito negativo de ser mais propícia à proliferação de fungos, como se vê pela evolução da curva LIM B II.

Por último, salientar que a solução de parede dupla que respeita o coeficiente de transmissão térmica de referência imposto pelo RCCTE [51] para a zona climática I<sub>3</sub> (zona climática com valores de coeficientes de transmissão térmica mais condicionantes), não apresenta qualquer risco.

<sup>26</sup> De acordo com o RCCTE [51], o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) de referência para uma parede exterior localizada na zona climática I<sub>3</sub> é de 0,5W/m<sup>2</sup>°C.

No próximo subcapítulo, usar-se-á a versão bidimensional, onde se estudará o risco de proliferação de fungos mais pormenorizado nos diferentes materiais que compõe a parede de alvenaria de tijolos (juntas de argamassa, tijolo, reboco).

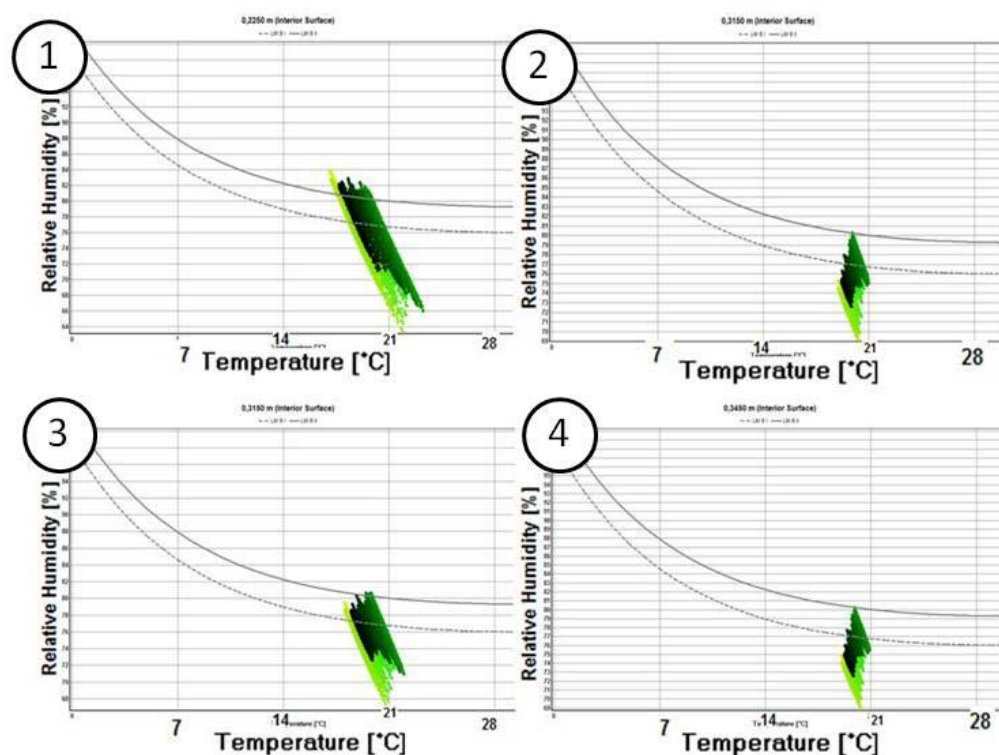


fig. 23 - Avaliação da existência de risco de proliferação de fungos para as soluções construtivas: Parede simples (1); Parede *sandwich* (2); Parede dupla sem Isolamento Térmico (3); Parede dupla (4)

#### 6.2.4.3. Avaliação pela versão bidimensional

Neste subcapítulo será analisado, para cada material que compõe uma parede de alvenaria de tijolo cerâmico, o risco de ocorrência de condensações superficiais e proliferação de fungos usando a versão bidimensional do WUFI. Para a obtenção destes resultados será analisada a evolução da temperatura e humidade relativa no paramento interno, para as zonas de tijolo cerâmico, junta de argamassa e zona estrutural de betão armado (zona de ponte térmica). A partir destes resultados, será feita a avaliação do risco do fenómeno de termoforese, como está descrito na Ficha nº 12 da PATTOREB [20]. Este fenómeno consiste na deposição diferencial de poeiras em suspensão [vd.fig. 24], resultado de heterogeneidades dos valores de resistência térmica que as soluções construtivas das diferentes zonas apresentam, dando origem a uma diferença considerável de temperaturas superficiais entre a zona do tijolo cerâmico e a junta de argamassa. A magnitude deste fenómeno é maior, quanto maior for a diferença de temperaturas superficiais entre as várias zonas.



fig. 24 - Deposição diferencial de poeiras em suspensão num paramento interior de uma parede exterior [20]

Outra situação que pode ser estudada é o aparecimento de manchas de bolor [ fig. 25] na zona do elemento estrutural (zona de ponte térmica), como foi analisado na Ficha 10 PATORREB [18].



fig. 25 - Manchas de bolor acentuadas junto à ligação parede exterior/ tecto numa instalação sanitária [18]

Os dados de entrada que são usados nestas simulações são os que estão presentes no Anexo B – Tabela 4 (mas agora na versão bidimensional do WUFI). As únicas diferenças estão nas soluções construtivas analisadas: parede *sandwich* e a parede com isolamento térmico pelo interior [vd.fig. 26]. Em ambas será estudada a interface da zona estrutural (laje e viga) em betão armado com a alvenaria cerâmica e a interface entre a junta de argamassa e o tijolo cerâmico. Na Tabela 4 estão as dimensões de todas as camadas e materiais.

Tabela 4 – Dimensões das camadas e materiais das soluções construtivas analisadas

	Dimensões (cm)
Altura do tijolo cerâmico	200
Espessura da laje	200
Altura da viga	400
Espessura do reboco	15
Espessuras das juntas de argamassa	15
Espessura do Isolamento Térmico	30

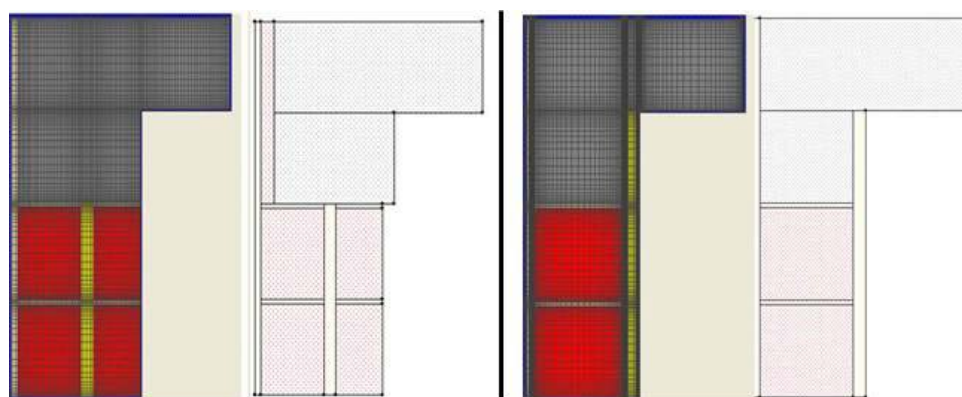


fig. 26 - Soluções construtivas: Parede *sandwich* e Parede com isolamento térmico pelo interior

No que refere à solução construtiva parede *sandwich*, os resultados de temperatura, humidade relativa e risco de proliferação de fungos estão na fig. 27. Nestes resultados verifica-se que as diferentes resistências térmicas apresentadas pelas zonas analisadas originam diferentes temperaturas superficiais. No gráfico de temperatura confirma-se que quanto maior a resistência térmica da solução construtiva, maior será a temperatura superficial interior da parede. Assim, a zona do tijolo cerâmico (zona corrente) regista maior temperatura e consequentemente menor humidade relativa que a zona de betão armado da viga (zona estrutural), podendo desta forma estarem reunidas as condições para a ocorrência das anomalias presentes na fig. 25. Em relação às juntas de argamassa registam-se maiores temperaturas (cerca de 1,5°C) do que na zona estrutural de betão armado, devido sobretudo a dois motivos: à sua maior resistência térmica e aos fenómenos de condução de calor entre elas e os elementos cerâmicos que se encontram a maior temperatura. Assim, a equação 6-1, que é utilizada frequentemente para o cálculo de temperaturas superficiais internas ( $T_{si}$ ), apenas é

válida para zonas homogêneas, não sendo directamente extrapolável para situações de elementos heterogêneos, como é o caso das paredes de alvenaria de tijolo [28]. Devido a estes fenómenos de condução de calor, a temperatura obtida pelo WUFI para a zona das juntas de argamassa é maior do que a que resulta da equação:

$$T_{si} = T_i - U / h_i \cdot (T_i - T_e) \quad (6-1)$$

Pode-se também concluir que umas das formas de atenuar estas diferenças de temperaturas entre a zona de tijolo cerâmico e a junta de argamassa é diminuir a espessura desta última [28]. Consequentemente também se pode afirmar que a presença do fenómeno de termoforese tem uma gravidade, que é função da espessura da junta.

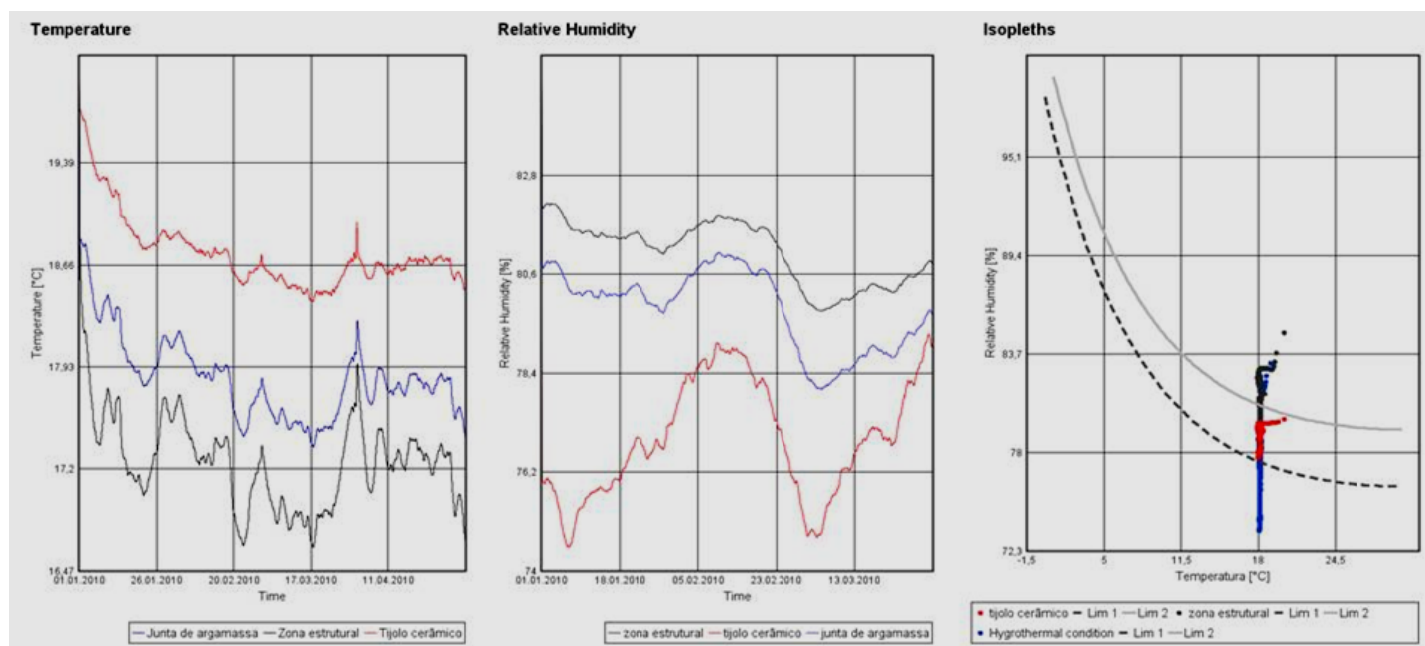


fig. 27 - Temperatura superficial, HR e risco de proliferação de fungos no paramento interior da parede exterior, para a solução de Parede *sandwich* (tijolo cerâmico a vermelho, junta de argamassa a azul e zona estrutural a preto)

Temperaturas superficiais distintas aumentam a susceptibilidade de ocorrência das anomalias observadas nas fig. 24 e fig. 25. De facto, estas heterogeneidades de temperatura superficial [vd.fig. 27] além de dar em origem ao fenómeno de termoforese, podem motivar a



ocorrência de fenómenos de proliferação de fungos só em determinadas zonas, pois a maioria dos materiais porosos apresentam um comportamento higroscópico<sup>27</sup> diferencial.

Com o objectivo de eliminar estas heterogeneidades, analisar-se-á uma solução muito utilizada na área da reabilitação que tem como efeito esbater as diferenças das resistências térmicas das três zonas que se estão a analisar. Assim, será colocado isolamento térmico pelo interior [vd.fig. 26] e não entre panos de alvenaria.

Ao observar-se a fig. 38 constata-se que a colocação de isolamento térmico interior faz com que o paramento interior da parede exterior fique com um comportamento mais homogéneo, uma vez que a temperatura nas duas zonas passa a ser praticamente igual, bem como a humidade relativa. Este facto é justificado pela totalidade do paramento apresentar isolamento térmico, eliminando o fenómeno de termoforese e o risco diferencial de proliferação de fungos.

No entanto, é importante ter presente que a colocação de isolante térmico pelo interior tem como aspecto positivo o paramento interior apresentar um comportamento mais homogéneo, mas não corrige a ponte térmica que existe ao nível da zona estrutural na parte da laje (que é obrigatório pelo RCCTE [51]).

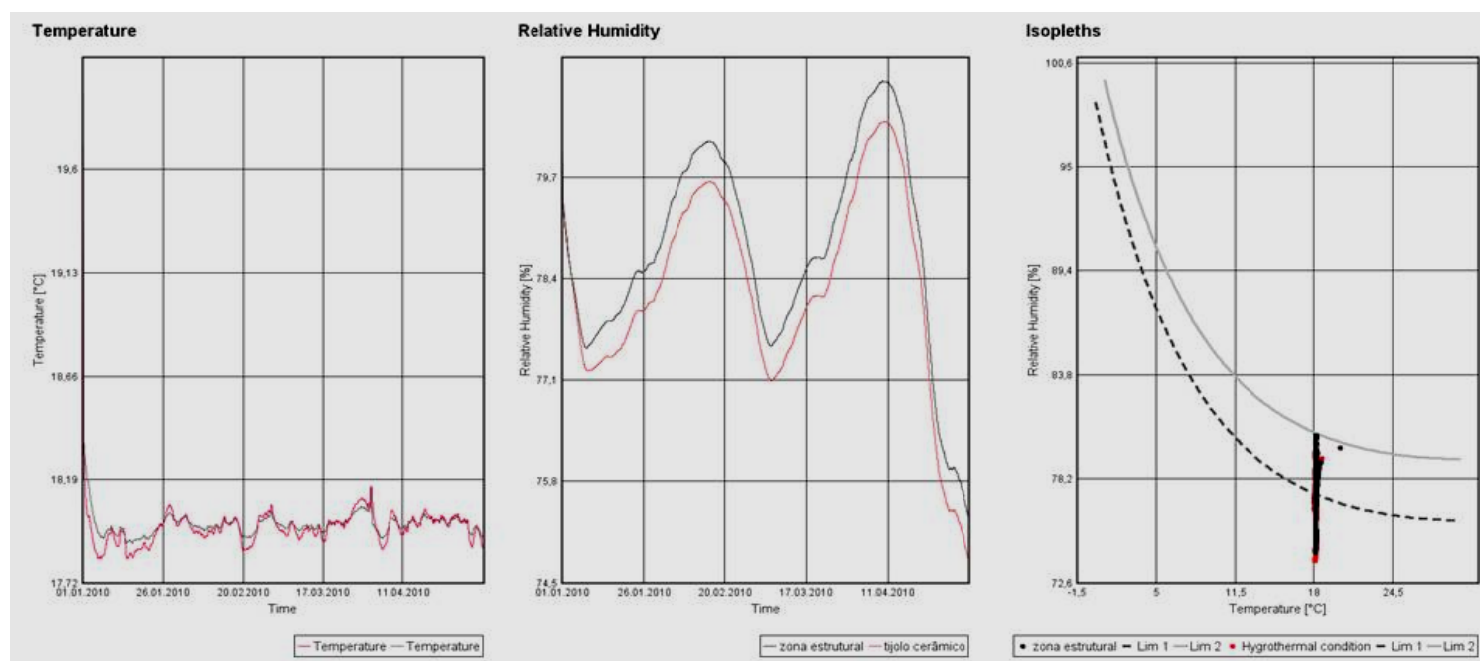


fig. 28 - Temperatura superficial, HR e risco de proliferação de fungos no paramento interior da parede exterior (zona corrente a vermelho, zona estrutural a preto), para a solução de Parede com isolamento térmico pelo interior

<sup>27</sup> Traduz-se na retenção de uma certa quantidade de humidade nos poros dos materiais quando colocados em contacto com ambientes húmidos [vd.3.3.1].

### **6.3. Comportamento do paramento exterior da parede exterior face às condições de fronteira e solução construtiva**

#### **6.3.1. Introdução**

Os sistemas de revestimento externo não contribuem para a estabilidade estrutural das construções [57], mas existem determinadas solicitações a que deverão resistir, sem ruptura nem destacamento em relação ao suporte, nomeadamente as solicitações higrotérmicas. Estas devem ser analisadas rigorosamente na fase de projecto, já que o custo da envolvente corresponde a cerca de 20% do custo total do edifício [21].

As solicitações higrotérmicas dão origem a várias anomalias, tais como expansão higrotérmica, termoforese e condensações superficiais exteriores. Estas anomalias serão estudadas nos próximos subcapítulos.

#### **6.3.2. Acção da Temperatura**

##### ***6.3.2.1. Colocação diferencial de isolante térmico na envolvente exterior***

###### ***6.3.2.1.1. Introdução***

A existência de heterogeneidades acentuadas na espessura de isolante térmico nas várias zonas (zona estrutural e corrente) que compõem a envolvente exterior dos edifícios dá origem a uma diferenciação nas temperaturas superficiais exteriores, motivando a ocorrência de fenómenos de termoforese (fenómeno já referenciado em 6.2.4.3).

Um exemplo real onde foi analisado a termoforese está descrito na Ficha 11 da PATORREB [19]. Na fachada deste edifício as manchas (provenientes da deposição de poeiras em suspensão nas zonas mais frias) estavam presentes de tal forma que olhando para a fachada era possível ver as juntas de argamassa e a disposição de elementos estruturais [vd.fig. 29].



fig. 29 – Fenómeno de termoforese numa fachada com revestimentos à base de ligantes minerais [19]

#### 6.3.2.1.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica

Os dados de entrada são os que estão descritos no Anexo B – Tabela 4 (mas agora na versão bidimensional do WUFI). As soluções estudadas neste subcapítulo são a parede *sandwich* sem forra cerâmica na zona de ponte térmica (sem correcção térmica); a mesma parede *sandwich*, mas com forra cerâmica, e por último parede com isolamento térmico pelo exterior (ETICS<sup>28</sup>) [vd.fig. 30]. Na Tabela 4 estão as dimensões de todas as camadas e materiais.

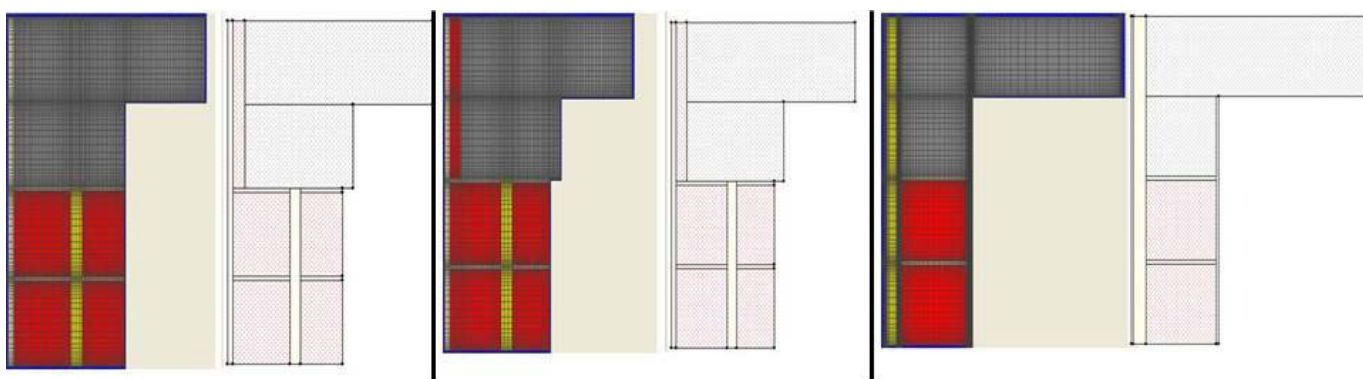


fig. 30 - Solução construtiva: parede *sandwich* sem correcção térmica, parede *sandwich* com correcção térmica e parede ETICS

#### 6.3.2.1.3. Avaliação da ocorrência de Termoforese nas diferentes soluções construtivas

No que refere à solução construtiva parede *sandwich*, sem forra cerâmica, o resultado das temperaturas superficiais no paramento exterior apresenta valores diferentes entre a zona estrutural e a zona corrente [vd.Anexo C – fig. 7]. A razão prende-se com a diferença de resistências térmicas entre estas zonas, à semelhança do que verificou no paramento interior [vd.6.2.4.3].

De forma a eliminar as heterogeneidades procedeu-se à correcção na zona de ponte térmica. Para tal, colocou-se uma forra cerâmica de três centímetros. Os resultados obtidos podem considerar-se positivos, já que se conseguiu reduzir a discrepância que havia de temperaturas entre a zona corrente e a zona estrutural [vd.Anexo C – fig. 8]. Assim, apesar das forras cerâmicas terem um contributo reduzido para o aumento da resistência térmica (o que origina uma redução pouco significativa do fluxo de energia), ao nível da eliminação das heterogeneidades das temperaturas superficiais tem um contributo interessante.

<sup>28</sup> Sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo reboco armado delgado sobre poliestireno expandido.

A última solução estudada foi o sistema ETICS. Ao visualizar os resultados [vd.fig. 31], claramente que sob ponto de vista da obtenção de um comportamento mais homogêneo ao longo da fachada, está é a melhor solução. Como se vê na fig. 31, ao nível do paramento exterior tanto a temperatura como a humidade relativa, apresentam valores muito semelhantes para a zona corrente e zona estrutural. Assim fica clarificada a razão do fenómeno de termoforese num paramento exterior ser um caso muito raro numa solução construtiva ETICS [5].

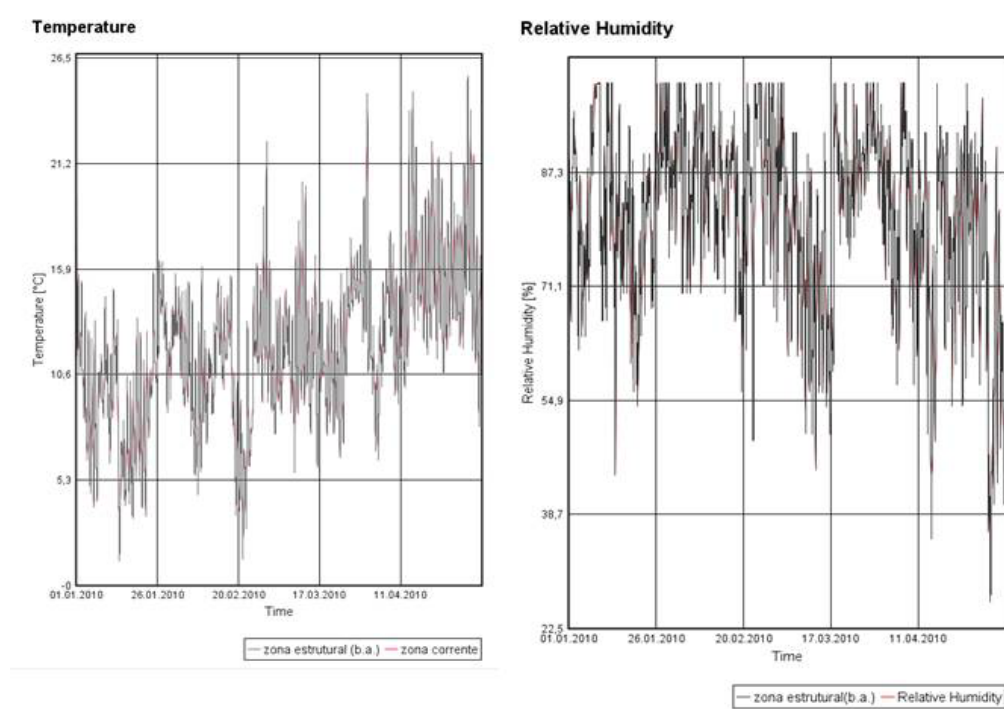


fig. 31 – Temperatura e HR no paramento exterior da parede exterior (solução ETICS), para as zonas: zona corrente e zona estrutural

### 6.3.2.2. *Paramento exterior da parede exterior com diferentes cores e orientações geográficas*

#### 6.3.2.2.1. *Análise dos parâmetros que influenciam a variabilidade dimensional*

A envolvente exterior dos edifícios pode atingir amplitudes térmicas durante um dia superiores a 50°C [vd.Anexo C - Tabela 1]. Estas solicitações podem provocar tensões ou deformações elevadas, consoante exista ou não restrição de movimentos, eventualmente incompatíveis com as propriedades dos materiais. Desta forma, será analisada a evolução da temperatura ao longo do período de um ano, para paramentos exteriores que tenham diferente cor e orientação geográfica.

O alongamento de um material sem restrições de movimento (isto é, deformação livre sem criar qualquer tipo de tensão) pode determinar-se aproximadamente pela seguinte expressão:

$$\Delta L = \alpha_l \times L_0 \times \Delta T \quad (6-2)$$

Onde  $\Delta L$  é variação de comprimento em metros,  $\alpha_l$  é o coeficiente de dilatação linear em  $1/^\circ\text{C}$ ;  $L_0$  é o comprimento inicial em metros e  $\Delta T$  é a variação de temperatura em  $^\circ\text{C}$  ou Kelvin, a que a superfície do paramento exterior está sujeita.

Pela equação 6-2 a variação dimensional que um dado material com um determinado comprimento poderá sofrer, está dependente do seu  $\alpha_l$  e da amplitude térmica ( $\Delta T$ ). No presente subcapítulo, será apenas focado o segundo parâmetro, através da análise da temperatura do paramento exterior.

O paramento exterior sujeito à radiação solar apresenta uma temperatura superior à temperatura ambiente, podendo atingir os valores definidos pela seguinte equação:

$$T_{se} = T_e + \frac{\alpha_s \times I}{h_{ext}} \quad (6-3)$$

Onde  $T_{se}$  é a temperatura superficial exterior em  $^\circ\text{C}$ ;  $T_e$  é a temperatura do ambiente exterior em  $^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_s$  coeficiente de absorção da radiação solar por onda curta [vd.4.2.3.1.3];  $I$  é a radiação solar global em  $\text{W/m}^2$  [vd.5.4] e  $h_{ext}$  é a *condutância térmica superficial* exterior em  $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$  [vd.4.2.3.1.1].

A temperatura exterior ( $T_e$ ) é a proveniente do ficheiro climático [vd.5.2]. Quanto ao valor de  $\alpha_s$  é sobretudo condicionado pela cor do paramento exterior. Na Tabela 5 apresentam-se as cores consideradas para o paramento exterior com os respectivos valores de  $\alpha_s$ .

Tabela 5 - Coeficientes de absorção de radiação de onda-curta para os 3 tipos de simulações estudadas [62]

Cor da superfície	Valor de $\alpha_s$
Branca	0,3
Vermelha	0,6
Preta	0,9

A intensidade de radiação solar global (I) (que inclui a componente directa e difusa) é outro factor que faz variar a temperatura superficial exterior de uma parede, dependendo de diversos factores, sendo que os estudados nestas simulações são:

- A estação do ano;
- A hora do dia;
- A orientação e inclinação da superfície que recebe a radiação;
- O ambiente circundante, nomeadamente o sombreamento que provoca sobre a superfície.

Em relação aos valores da radiação ao longo das estações do ano, são dados que o ficheiro climático tem presentes [vd.5.4]. A orientação e a inclinação da superfície que recebe a radiação são também tidas em conta no processo de cálculo, entrando como *inputs* [vd.4.2.2]. Para o ambiente circundante, o programa WUFI não dispõe de uma opção para ter em conta a existência de um sombreamento que origine uma diminuição da radiação solar incidente [vd.2.8.2].

Na Tabela 6 estão os valores máximos e médios da intensidade de radiação solar (I) obtidos na simulação com o ficheiro climático de Lisboa, para as diferentes orientações geográficas. Estes valores estão em sintonia com as observações feitas em 5.4, obtidas através da visualização da evolução anual da intensidade de radiação solar para as diferentes orientações.

Tabela 6 – Valores médios e máximos de intensidade de radiação solar (I) para as diferentes orientações geográficas, obtidos pelo WUFI

	Orientações Geográficas		
	Sul	Oeste/Este	Norte
Radiação Solar Difusa / Radiação Solar	60,3%	75,5%	94,2%
Média da Radiação Solar (W/m <sup>2</sup> ) *	209,2	165,4	71,1
Máx. Radiação Solar (W/m <sup>2</sup> )	839,7	822,5	286,5
Dia da ocorrência da máx. Radiação Solar	15-11-2010	09-03-2010	20-06-2010
*contabilizando apenas as horas onde há radiação			

Por último falta analisar a *condutância térmica superficial exterior* ( $h_{ext}$ ). Esta depende dos fenómenos de convecção e radiação, que assumem valores constantes de 4,5 W/m<sup>2</sup>K (para uma velocidade nula do vento) e 6.5 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente [vd.4.2.3.1.1]. Outro factor também presente na equação 4-2 é a velocidade do vento, que dá origem a uma convecção

forçada e não natural. É esta grandeza que provoca uma enorme variabilidade no valor de  $h_{\text{ext}}$  [vd.fig. 32], dado que as outras grandezas assumem um valor constante ao longo do tempo.

Uma vez que na maioria das vezes os ventos de Norte são mais fortes [30], e atendendo a que a velocidade do vento e  $h_{\text{ext}}$  são grandezas proporcionais, é facilmente perceptível que para a orientação Norte regista-se maiores valores de  $h_{\text{ext}}$  [vd.fig. 32]. Assim, para a orientação Norte existe maior transferência de calor entre a superfície e o meio circundante por convecção forçada, o que dá origem a menores valores de temperatura no paramento exterior.

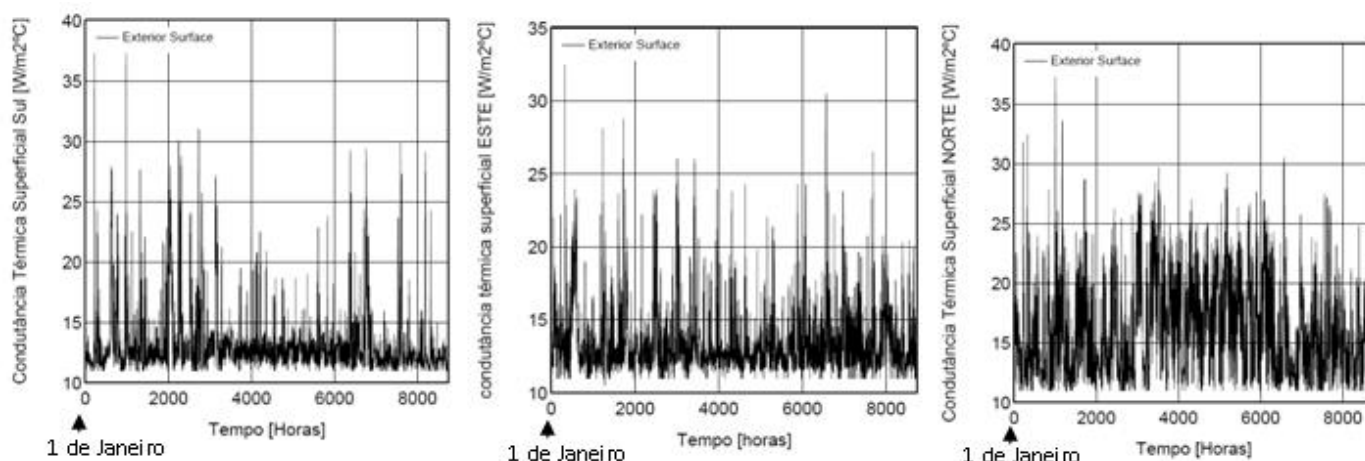


fig. 32 - Condutâncias térmicas superficiais exteriores na envolvente Sul, Este e Norte, respectivamente

#### 6.3.2.2.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higratérmica

Neste subcapítulo são estudadas nove simulações, sendo que, a solução construtiva utilizada é uma parede *sandwich* com isolante térmico EPS<sup>29</sup> de 4cm, sendo revestida externamente por um revestimento cerâmico [vd.Anexo B – Tabela 1]. Como já foi referido, utilizam-se nas simulações três diferentes cores (branca, vermelha e preta) e para cada uma delas, analisaram-se três diferentes orientações: Norte, Este<sup>30</sup> e Sul.

No que refere ao processo de cálculo foi desactivada a opção: transporte de humidade (*Moisture Transport Calculation*) [vd. Anexo B – Tabela 1], dado o facto de se querer apenas estudar o efeito das grandezas relacionadas com o fluxo de calor (como é o caso da intensidade de radiação solar,  $\alpha_s$ , entre outras) no valor da temperatura do paramento exterior.

<sup>29</sup> Poliestireno expandido

<sup>30</sup> A orientação Oeste não foi usada, uma vez que tem valores médios semelhantes aos valores da orientação Este.

#### 6.3.2.2.3. *Análise dos resultados obtidos para o valor da temperatura*

Os resultados dos valores mínimos e máximos de temperatura superficial exterior e a maior amplitude térmica para cada uma das nove simulações são apresentados no Anexo C - Tabela 1.

O valor das amplitudes térmicas máximas diárias é um aspecto relevante, pois é uma das principais razões para ao aparecimento de fissuração no revestimento cerâmico, uma vez que a amplitude térmica influencia a variabilidade dimensional dos elementos do paramento exterior [vd.6.3.2.2.1].

Nos resultados obtidos, a maior amplitude térmica foi registada para a orientação Sul com uma cor preta. Este resultado é explicado analisando os factores:  $I$ ,  $h_{ext}$  e  $\alpha_s$ . Como observado em 6.3.2.2.1, é para orientação a Sul que durante o dia se registam os maiores valores de  $I$  e os menores valores de  $h_{ext}$ , traduzindo-se numa maior temperatura superficial. Deste modo, e tendo em conta que durante a noite o valor de  $I$  é nulo (contribuição nula para o valor da temperatura superficial), as amplitudes máximas registam-se na orientação Sul.

Quanto ao valor de  $\alpha_s$ , observando a equação 6-3, este coeficiente aparece a multiplicar por  $I$ . Assim sendo, para cada orientação (para cada valor de  $I$ ), quanto maior o valor de  $\alpha_s$ , maior será a amplitude térmica. Este raciocínio matemático tem toda a coerência em termos físicos, pois é natural que uma superfície que tenha maior  $\alpha_s$ , consiga absorver mais energia de radiação por onda curta durante o dia e consequentemente atinja uma temperatura superior. Já durante a noite como não existe radiação solar, independentemente do valor de  $\alpha_s$ , não haverá absorção de radiação por onda curta pelo paramento exterior, não provocando um aumento da temperatura da superfície. Desta forma, confirma-se que uma superfície com um valor de  $\alpha_s$  mais elevado terá uma maior amplitude térmica.

#### 6.3.2.2.4. *Análise da influência dos resultados obtidos na variabilidade dimensional*

Depois da análise dos resultados obtidos para as temperaturas do paramento exterior, já é possível fazer considerações sobre as variabilidades dimensionais (expansões térmicas) que os revestimentos cerâmicos poderão ter. No caso de ladrilhos de cor escura em paredes exteriores orientadas a Sul, a amplitude máxima diária chega a atingir o valor de  $53,6^{\circ}\text{C}$  [vd. Anexo C - Tabela 1]. Para um valor de  $\alpha_l$  igual a  $9 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  [57], obtém-se um  $\Delta L = 0,48 \text{ mm/m}$ . Se não houver restrição à livre deformação dos ladrilhos, para um formato de  $0,15 \times 0,15 \text{ m}$  podem ocorrer então variações dimensionais na ordem dos  $0,07 \text{ mm}$  por ladrilho



em qualquer uma das direcções. Desta forma, é necessário proceder a um criterioso dimensionamento das juntas (entre ladrilhos e de fraccionamento), assim como dos elementos de fixação do suporte, especialmente se forem aplicados a elevada altura [57].

### 6.3.3. Acção da humidade

#### 6.3.3.1. Introdução

A fixação e desenvolvimento de microorganismos numa fachada contribuem significativamente para a degradação visual desta. No entanto, esta é uma anomalia que não provoca a destruição do suporte. Este fenómeno ocorre preferencialmente em superfícies que permanecem húmidas por períodos de tempo prolongados [17].

O teor de humidade à superfície, que é o principal causador do desenvolvimento de microorganismos [22] é função de 3 parâmetros:

- A humidificação pela chuva incidente na fachada (acção conjunta do vento e da chuva);
- A humidificação por condensação superficial, que ocorre sobretudo em situações de céu limpo sempre que a temperatura superficial é inferior à temperatura de ponto de orvalho [vd.4.5.2];
- O processo de secagem.

Estes três parâmetros são influenciados pelos seguintes factores:

- Orientação, que altera a quantidade de radiação atmosférica e solar incidente na fachada, bem como a *quantidade de chuva incidente*;
- Direcção e velocidade do vento que vai influenciar a direcção da chuva;
- Propriedades físicas dos materiais que constituem o sistema (resistência térmica, emissividade, absorção de água líquida, etc.).

Posteriormente será analisado cada um dos três parâmetros, simulando diferentes soluções construtivas e condições de fronteira.

### **6.3.3.2. Humidificação devido a condensações superficiais**

#### **6.3.3.2.1. Fenómeno de condensações superficiais no sistema ETICS**

As condensações superficiais ocorrem sempre que a temperatura da superfície exterior é inferior à temperatura de ponto de orvalho do ar próximo dessa superfície. A diminuição acentuada da temperatura superficial resulta de um *balanço radiativo total*<sup>31</sup> *negativo* na superfície exterior da fachada, que se verifica sobretudo durante a noite quando a quantidade de radiação emitida pelo edifício é superior àquela que recebe da atmosfera e das superfícies vizinhas [16]. No entanto, durante o dia este balanço negativo é compensado pela radiação solar (radiação por onda curta) [35]. Este fenómeno verifica-se em todas as superfícies exteriores, mas tem consequências mais gravosas nos ETICS, cuja inércia térmica do reboco delgado é muito reduzida [39].

A ocorrência de condensações superficiais faz aumentar o teor de humidade à superfície. Se o processo de secagem não for suficientemente rápido, o teor de humidade mantém-se elevado por períodos de tempo prolongados, aumentando desta forma o risco de desenvolvimento de microrganismos.

O problema do excesso de humidade à superfície pode também acontecer devido à chuva incidente [vd.6.3.3.3], atingindo-se facilmente nesta situação a *free saturation* (humidade relativa igual a 100%) [vd.3.3.1]. Para não mascarar os resultados, isto é, para ter a certeza que uma situação de humidade relativa igual a 100% numa superfície externa é devida exclusivamente às condensações superficiais e não à chuva incidente, o *output* pedido ao programa não foi a grandeza humidade relativa da superfície exterior, mas sim a sua temperatura e a respectiva temperatura de orvalho.

#### **6.3.3.2.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica**

A solução construtiva usada nas simulações para estudar a humidificação na envolvente devido a condensações superficiais foi o sistema ETICS, que tem vindo a ser aplicado em Portugal desde a década de 90, quer em edifícios novos quer em obras de reabilitação [5]. Contudo, o sucesso desta tecnologia tem sido travado pela degradação do aspecto exterior devido ao desenvolvimento de microrganismos [16], sobretudo em fachadas orientadas a Norte [vd.fig. 33], onde a humidade está presente num maior período temporal.

---

<sup>31</sup> Este balanço radiativo total resulta das trocas de radiação por onda longa e onda curta.



fig. 33- Colonização biológica numa fachada orientada a Norte

Para a simulação higrotérmica padrão, isto é, para a simulação que servirá de referência aos resultados obtidos nas restantes simulações, os *inputs* estão indicados no Anexo B - Tabela 5. O período de simulação é de dois anos e pretende-se calcular o número de horas em que ao longo deste período acontecerão condensações superficiais. De salientar que na definição das condições do ambiente interno se optou pela EN13788 [vd.4.4.2.3]. A escolha desta norma prende-se com o facto de ser possível definir um valor de temperatura para o ambiente interior, podendo deste modo estudar-se a influência desta grandeza na ocorrência de condensações superficiais na superfície exterior.

#### 6.3.3.2.3. Modelação do overcooling no WUFI

Neste subcapítulo serão apresentados os pressupostos do WUFI para estudar o fenómeno de *overcooling*, bem como o seu processo de cálculo.

Numa situação em que a superfície da envolvente tenha a mesma temperatura que o ambiente terrestre, a superfície sofrerá alguma perda de radiação por onda-longa porque as trocas por radiação não são apenas as trocas com o ambiente terrestre, mas também as trocas com a atmosfera, cujos principais constituintes (moléculas biatómicas  $N_2$  e  $O_2$ ) são fracos emissores térmicos [41].

A superfície duma envolvente tem uma emissão uniforme de ondas longas ( $I_e$ ), mas da radiação que recebe, apenas a referente ao ângulo ocupado por objectos terrestres ( $g_{terr}$ ), a chamada *radiação terrestre de onda longa*, tem intensidade comparável. Quanto à radiação de onda longa que recebe do ângulo ocupado pela atmosfera ( $g_{atm}$ ), a chamada *radiação atmosférica de onda longa*, tem uma intensidade geralmente inferior à emissão de radiação

pela superfície da envolvente, mesmo que ambas estejam à mesma temperatura [63]. A *radiação atmosférica de onda longa* depende da nebulosidade. Para situações de céu encoberto (corpo cinzento) a energia emitida por este e pelo edifício é semelhante, mas já numa situação de céu limpo (corpo não cinzento), a energia emitida pelo céu é menor que a energia emitida pelo edifício [3]. Assim, uma superfície da envolvente emite mais radiação de onda-longa do que recebe do ambiente, o que origina uma contínua perda de calor, provocando o fenómeno de *overcooling*, especialmente em noites de céu limpo.

Ao ocorrer o fenómeno de *overcooling*, o fluxo de calor por convecção e radiação na superfície tem direcções opostas, enquanto o fluxo de radiação é perdido da superfície da envolvente em direcção ao céu, o fluxo por convecção tem o sentido inverso, uma vez que a superfície está a uma temperatura menor. Esta situação não pode ser tratada com a simples equação 4-4, pois esta apenas pode ser usada quando ambos os fluxos têm a mesma direcção [41]. Se o fenómeno de *overcooling* for modelado na simulação, a parte da radiação deve ser removida do valor da *condutância térmica superficial* (WUFI subtrai os 6,5 W/m<sup>2</sup> K), para que as trocas de calor por radiação de onda-longa sejam calculadas separadamente das trocas de calor por convecção. Desta forma será vantajoso combinar as trocas por radiação de onda-longa e onda-curta, através de uma fonte de calor total na superfície envolvente, que resulta do balanço total de radiação: “*Balanço radiativo explícito*”, para permitir o cálculo do fenómeno de *overcooling* à noite [7]. Este balanço toma o valor positivo ou negativo, consoante o valor das componentes apresentadas na fig. 34.

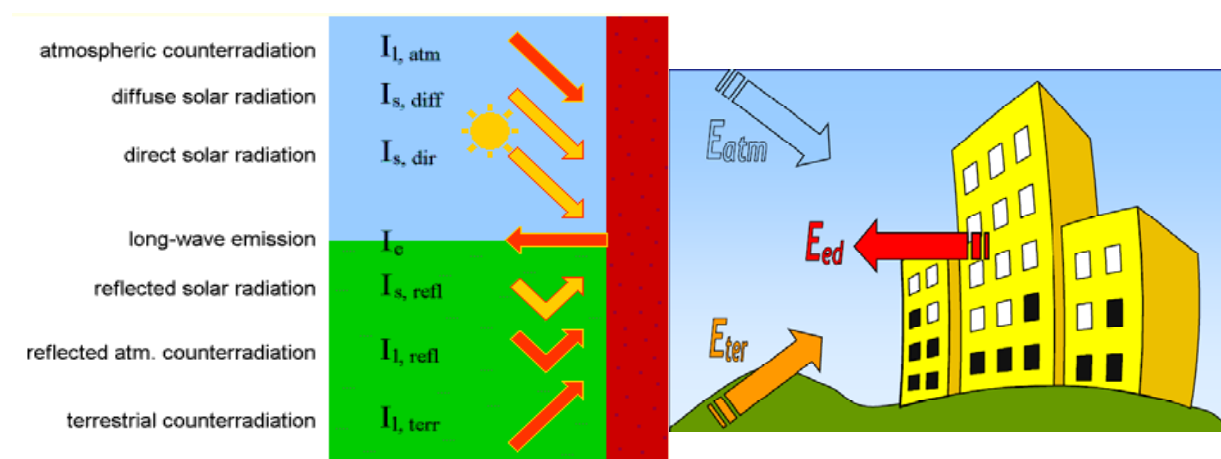


fig. 34- Componentes da radiação que entram para o cálculo do “*Balanço radiativo explícito*” [64]

Seguidamente serão analisadas todas estas componentes e a forma que o WUFI segue para obter o seu valor.

A equação 6-4 é a fórmula geral para o cálculo do balanço radiativo total (I). Um valor positivo de I, resulta num aquecimento da superfície, já um valor negativo provoca um arrefecimento, resultando no fenómeno de *overcooling*.

$$I = \alpha \times I_s + \epsilon \times I_l - I_e \quad (6-4)$$

em que:

$I$  [ $\text{W/m}^2$ ]: balanço radiativo total na superfície da envolvente

$\alpha$  [-]: coeficiente de emissão de onda curta da superfície da envolvente

$I_s$  [ $\text{W/m}^2$ ]: radiação normal de onda curta incidente na superfície da envolvente

$\epsilon$  [-]: coeficiente de emissão de onda longa da superfície da envolvente

$I_l$  [ $\text{W/m}^2$ ]: radiação normal de onda longa incidente na superfície da envolvente

$I_e$  [ $\text{W/m}^2$ ]: emissão radiativa de onda longa emitido pela superfície da envolvente

A partir da equação 6-5 obtém-se a radiação normal de onda curta incidente na superfície ( $I_s$ ), que resulta da soma de três valores: um corresponde à fracção da radiação solar que vem directamente do sol e incide na superfície da envolvente ( $I_{s,dir}$ ), obtida a partir do valor da radiação horizontal directa ( $I_{s,dir,h}$ ), tendo em conta a posição do sol e a orientação e inclinação da superfície [vd.4.2.2]; outro valor é a radiação solar difusa ( $I_{s,dif}$ ) que corresponde à fracção da radiação solar espalhada pela atmosfera e pelas nuvens, incidente em todas as direcções, e é multiplicado pela fracção de visão do céu ( $g_{atm}$ ), resultando na radiação solar difusa incidente na superfície do edifício; o último valor é a radiação solar reflectida pelo solo ( $I_{s,refl}$ ) que é multiplicado pela fracção de visualização do ambiente terrestre ( $g_{terr}$ ), resultando na radiação solar reflectida pelo solo, incidente na superfície do edifício.

$$I_s = I_{s,dir} + g_{atm} \times I_{s,dif} + g_{terr} \times I_{s,refl} \quad (6-5)$$

em que:

$I_{s,dir}$  [ $\text{W/m}^2$ ]: radiação solar directa

$g_{atm}$  [-]: factor atmosférico do campo de visão

$I_{s,dif}$  [ $\text{W/m}^2$ ]: radiação solar difusa

$g_{terr}$  [-]: factor terrestre do campo de visão

$I_{s,refl}$  [ $\text{W/m}^2$ ]: radiação solar reflectida pelo solo

O  $I_{s,refl}$  é a radiação de onda curta que atinge a superfície do edifício, após ter sido reflectida pelo solo ou outros objectos terrestres. Este valor nem sempre existe nos ficheiros climáticos, no entanto pode ser calculado de uma forma empírica, a partir da soma da radiação solar directa e difusa e pelo factor de reflectividade de onda curta terrestre ( $\rho_{s,terr}$ ) como se vê na equação 6-6.

$$I_{s,rfl} = \rho_{s,terr} \times ( I_{s,dir,h} + I_{s,diff} ) \quad ( 6-6)$$

em que:

$\rho_{s,terr}$  [-]: reflectividade de onda-curta terrestre

A partir equação 6-7 obtém-se a radiação normal de onda longa incidente na superfície ( $I_l$ ). Esta resulta da soma de três valores: um corresponde à radiação de onda longa emitida pelo céu e é multiplicado pela fracção de visão do céu ( $g_{atm}$ ), resultando na radiação atmosférica de onda longa incidente sobre a superfície do edifício; outro valor é a radiação atmosférica de onda longa reflectida pelo solo ( $I_{l,refl}$ ), que é calculado a partir  $I_{l,atm}$  e da reflectividade de onda longa terrestre ( $\rho_{l,terr}$ ) (equação 6-9), sendo este multiplicado pela fracção de visualização do ambiente terrestre ( $g_{terr}$ ), obtendo-se assim a radiação de onda longa reflectida (pelo solo ou outros objectos terrestres ) incidente na superfície do edifício; o último valor é a radiação de onda longa emitida pela superfície terrestre ( $I_{l,terr}$ ), calculado pela equação 6-8 e também é multiplicado por  $g_{terr}$ , resultando na radiação de onda longa emitida pela superfície terrestre incidente na superfície do edifício.

$$I_l = g_{atm} \times I_{l,atm} + g_{terr} \times (I_{l,terr} + I_{l,refl}) \quad (6-7)$$

em que:

$I_{l,atm}$  [ $W/m^2$ ]: radiação atmosférica de onda longa

$I_{l,terr}$  [ $W/m^2$ ]: radiação terrestre de onda longa

$I_{l,refl}$  [ $W/m^2$ ]: radiação atmosférica de onda longa reflectida pelo solo

A equação 6-7 contém três componentes da radiação de onda longa, geralmente nem todos têm valores horários presentes nos ficheiros climáticos (como é o caso do ficheiro climático de Lisboa), logo não poderão ser lidos directamente do ficheiro climático. No entanto podem ser calculados de uma forma empírica, como se pode ver nas equações:

$$I_{l,terr} = \epsilon_{l,terr} \times \sigma T_{sup}^4 \quad (6-8)$$

em que:

$\sigma$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]: constante de Stefan-Boltzmann (5.67x10<sup>-8</sup>)

$\epsilon_{l,terr}$  [-]: emissividade de onda-longa do solo

$T_{terr}$  [-]: temperatura do solo (considerada igual à temperatura do ar exterior)

$$I_{l,refl} = \rho_{l,terr} \times I_{l,atm} \quad (6-9)$$

em que:

$\rho_{l,terr}$  [-]: reflectividade de onda-longa do solo

Nota: Deve-se referir que o somatório dos coeficientes de emissividade de onda-longa do solo ( $\epsilon_{l,terr}$ ) e a reflectividade de onda-longa do solo ( $\rho_{l,terr}$ ) deverão ser igual a um. Estes parâmetros adicionais são também introduzidos no menu "*Coeficientes Transferência de Superfície*".

As duas fracções de visão presentes nas equações anteriores são calculadas pela equação:

$$g_{atm} = \cos^2(\beta/2) \quad (6-10)$$

$$g_{terr} = 1 - g_{atm}$$

em que:

$\beta$  [°]: inclinação da superfície (90° para uma parede vertical)

Todas as componentes da radiação mencionadas até agora são em geral explicitamente conhecidas antes da simulação, ou são determinadas pelo WUFI utilizando as fórmulas empíricas referidas anteriormente. Estas componentes não dependem dos resultados ainda desconhecidos da simulação, à excepção da emissão de onda longa pela superfície ( $I_e$ ), que depende da temperatura da superfície exterior através da lei de Stefan-Boltzmann:

$$I_e = \epsilon \times \sigma \times T_{sup}^4 \quad (6-11)$$

em que:

$\sigma$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]: constante de Stefan-Boltzmann (5.67x10<sup>-8</sup>)

$T_{sup}$  [K]: temperatura da superfície exterior do edifício

A radiação atmosférica de onda-longa ( $I_{l,atm}$ ) também é uma grandeza que em certos ficheiros climáticos não existe valores horários medidos (como o ficheiro climático de Lisboa [vd.4.4.1]). No entanto, pode ser estimada através de uma fórmula empírica (equação 6-12). Nesta equação está presente o índice de nebulosidade (N), que corresponde à fracção do céu coberto por nuvens.

$$I_{l,atm} = N \times I_{nuvens} + (1 - N) \times I_{ar} \quad (6-12)$$

N [-]: índice de nebulosidade

$$I_{ar} = \sigma \cdot T^4 (0.79 - 0.174 \times 10^{-0.041P})$$

T [K]: temperatura do ar medida pela estação meteorológica

P [hPa]: pressão de vapor medida pela estação meteorológica

$$I_{nuvens} = \sigma \times T_D^4$$

$T_D$  [K]: temperatura de ponto de orvalho medida pela estação

Por último é importante salientar que sem a opção “*Balanco Radiativo Explicito*” activada, a temperatura superficial da superfície exterior será sempre superior à temperatura do ambiente exterior, sendo deste modo impossível estudar o fenómeno de *overcooling*.

#### 6.3.3.2.4. Resultados Obtidos e respectivas análises

Os resultados obtidos são o número de horas em que existe o risco de ocorrência de condensações, ou seja, o número de horas em que a temperatura da superfície exterior é menor que a temperatura de orvalho. Para o cálculo da temperatura de orvalho, o WUFI utiliza as fórmulas usadas no diagrama psicométrico [vd.Anexo A - fig. 2]. Seguidamente será feita uma análise de sensibilidade, em que se avaliará a influência de vários aspectos, nomeadamente das propriedades do reboco exterior, características da fachada, clima exterior e condições interiores.

#### - Influência das propriedades do reboco exterior

Ao nível do reboco exterior a primeira alteração que foi feita às propriedades do reboco em relação ao caso inicial, foi considerar que o *coeficiente de transferência de água líquida* ( $D_w$ ) [vd.3.3.2] era igual a zero, ou seja, que não existia transporte de água líquida ao longo do reboco, não havendo desta forma migração de água até à superfície. Isto implica que se irá



acumular muita humidade junto à superfície, pois esta só poderá atravessar o reboco por difusão (que é um processo mais lento do que o transporte capilar). Este aumento de humidade levará a que existam mais períodos com humidade relativa igual a 100% na superfície [vd.Tabela 7].

No que refere ao valor do factor de resistência à difusão de vapor ( $\mu$ ) [vd.3.2.5] do reboco, considerou-se um aumento do valor de 100 para 1000. Este aumento da resistência à difusão irá diminuir a *densidade do fluxo de vapor de água* ( $gv$ ) [vd.3.3.6], desta forma há um acréscimo da pressão parcial de vapor de água que provoca o aumento da humidade relativa, levando a um maior período em que ocorrem condensações superficiais [vd.Tabela 7].

A emissividade ( $\varepsilon$ ) [vd.4.2.3.1.4] foi outra das propriedades do reboco analisada. Neste caso considerou-se uma redução da emissividade de 0,9 para 0,6. O resultado foi uma redução bastante expressiva do número de horas em que existe condensações superficiais [vd.Tabela 7], pois, uma redução na emissividade origina uma diminuição da emissão de radiação de onda longa pela superfície do edifício ( $I_e$ ) (equação 6-11), tendo como consequências um acréscimo do valor do balanço radiativo total na superfície ( $I$ ), que provocará um aumento da temperatura da superfície exterior. Assim sendo, reduzem-se o número de horas em que existem condensações superficiais.

No que refere ao coeficiente de absorção de radiação por onda curta ( $\alpha_s$ ), considerou-se um aumento do valor de 0,4 para 0,8. O resultado deste aumento surtiu também numa redução do número de horas em que existem condensações superficiais [vd.Tabela 7], pois um aumento de  $\alpha_s$  originará uma maior absorção de radiação solar por onda curta, consequentemente haverá um aumento do valor do balanço radiativo total na superfície ( $I$ ) (equação 6-4) provocando então um aumento da temperatura da superfície exterior.

Tabela 7 - Influência das propriedades do reboco exterior no número de horas em que ocorrem condensações superficiais na superfície exterior

Propriedades do Caso inicial:	Nº de horas de condensações superficiais:	
	Caso inicial	151
	- Reboco com $D_w \neq 0$	420
	- Reboco $c/\mu=100$	232
	- Envolvente $c/\varepsilon=0,9$	16
	- Envolvente $c/\alpha_s=0,4$	44

### - Influência das características da fachada

Ao nível das características da fachada avaliou-se a influência da orientação geográfica e a espessura do isolante térmico. No que refere à orientação geográfica, a orientação Este foi a que apresentou um menor número de horas de ocorrência de condensações e a orientação Norte foi a que apresentou um maior número [vd.Tabela 8]. Em relação à orientação Norte, este resultado é explicado por dois aspectos: a secagem da parede é menor para esta orientação (devido à radiação solar recebida ser muito inferior à recebida pelas outras orientações [vd.5.4]) e a temperatura que a superfície exterior tem durante a noite ser menor (pois a temperatura que a superfície exterior atinge durante o dia é menor e esta influencia a temperatura que a superfície exterior apresentará à noite). Em relação às outras orientações, o resultado mais surpreendente é o número de horas em que ocorrem condensações ser menor para a orientação Este do que para a orientação Sul [vd.Tabela 8]. À partida tudo indicaria que a orientação Sul tivesse um menor número, dado que recebe maior radiação solar. A única explicação para este resultado pode ser devido à orientação que o sol tem ao longo do dia. Como a orientação Este é a primeira a receber a radiação solar directa, a secagem de possíveis condensações que tenham existido durante a noite ocorre mais depressa.

Quanto à espessura do isolante térmico aumentou-se de 4 para 6cm. O resultado foi um aumento do número de horas em que ocorrem condensações [vd.Tabela 8]. A justificação é simples: quanto maior a espessura do isolante térmico, maior a resistência térmica da secção transversal da parede, consequentemente menor é o fluxo de calor que vem do interior e chega à superfície exterior, resultando numa menor temperatura desta.

Tabela 8 - Influência das propriedades das características da fachada no número de horas em que ocorrem condensações superficiais na superfície exterior

Propriedades do Caso inicial: - Orientação Oeste - IT c/ espessura = 4cm	Nº de horas de condensações superficiais:	
	Caso inicial	151
	Orientação Norte	280
	Orientação Este	12
	Orientação Sul	25
	IT c/ espessura = 6cm	464

## - Influência do clima exterior

Neste tópico será estudada a influência das condições do clima exterior na ocorrência de condensações superficiais. A utilidade desta análise em fase de projecto higrotérmico é reduzida, dado a impossibilidade de mudar qualquer uma destas grandezas. No entanto, é importante ter uma noção de qual a influência destas na avaliação da ocorrência de condensações superficiais.

Em relação ao vento, alterou-se a velocidade deste para zero, resultando num aumento da ocorrência de condensações superficiais [vd.Tabela 9]. A razão é que ao anular-se o vento, elimina-se as trocas convectivas entre a superfície e o ambiente exterior, originando a nulidade da parte convectiva da *condutância térmica superficial* ( $h_{\text{conv}}$ ). Como durante a noite, a temperatura à superfície é menor que a temperatura do ambiente exterior (fenómeno de *overcooling*), esta anulação das trocas convectivas originará a anulação de algum fluxo de calor que a superfície pudesse receber do ambiente exterior por convecção.

A chuva também foi outras das propriedades do clima exterior analisada. À semelhança do vento, também se estudou a anulação desta. Neste caso não houve uma alteração significativa no número de horas em que existem condensações superficiais [vd.Tabela 9], podendo então concluir-se que de acordo com o WUFI a chuva não tem influência na ocorrência de condensações superficiais. A justificação é devido a uma limitação que o WUFI tem, ao não considerar o aumento da entalpia<sup>32</sup> resultante do aumento da água líquida (devido à chuva), ou seja, o WUFI não considera que uma superfície por estar molhada está mais fria.

No que refere ao coeficiente de reflectividade de onda curta ( $\rho_{s,\text{terr}}$ ), quanto maior o seu valor, maior será a radiação solar reflectida pelo solo ( $I_{s,\text{refl}}$ ) e consequentemente maior será a radiação normal de onda curta incidente na superfície ( $I_s$ ) (equação 6-5). Um maior valor de  $I_s$  origina um valor maior do balanço radiativo total na superfície da envolvente, o que provocará um aumento da temperatura da superfície exterior. Desta forma é perceptível que um valor maior para  $\rho_{s,\text{terr}}$ , tenha como resultado menos condensações superficiais exteriores.

Em relação ao índice de Nebulosidade (N), aumentou-se o seu valor de 0,42 para 0,52. Este aumento provocou um menor número de horas de ocorrência de condensações [vd.Tabela 9]. Um aumento do N origina um aumento da radiação atmosférica de onda longa ( $I_{l,\text{atm}}$ ), consequentemente há também um aumento da radiação normal de onda longa

---

<sup>32</sup> A entalpia de uma massa de ar representa a energia contida nessa massa de ar, esta é dependente da temperatura e humidade absoluta do ar [49].

incidente na superfície ( $I_1$ ), que por sua vez, provoca um valor maior do balanço radiativo total na superfície da envolvente, dando origem a uma maior temperatura à superfície. Isto explica a razão porque em noites de céu limpo (menor valor de  $N$ ) existem maiores riscos para que ocorram condensações na superfície exterior da parede exterior.

Tabela 9 - Influência do clima exterior no número de horas em que ocorrem condensações superficiais na superfície exterior

Propriedades do Caso inicial: - Vento $\neq 0$ m/s - Quant. da chuva Incidente $\neq 0$ l/m <sup>2</sup> - Reflectividade de onda curta ( $\rho_{s,terr}$ )= 0,2 - Índice de Nebulosidade ( $N$ ) = 0,42	Nº de horas de condensações superficiais:	
	Caso inicial	151
	Vento = 0 m/s	346
	Quant. da chuva Incidente = 0 l/m <sup>2</sup>	157
	Reflectividade de onda curta ( $\rho_{s,terr}$ )= 0,1	363
	Índice de Nebulosidade ( $N$ ) = 0,52	62

#### - Influência das condições interiores

Neste tópico será estudada a influência das condições do ambiente interior na ocorrência de condensações superficiais exteriores. A utilidade desta análise em fase de projecto higrotérmico é significativa, pois para este caso existe a possibilidade de mudar as cargas higrotérmicas, nomeadamente a temperatura.

A temperatura do ambiente interior faz variar o fluxo de calor por condução, ou seja, o fluxo de calor que atravessa a solução construtiva. Quanto maior for a temperatura interior, maior será o gradiente térmico que a solução construtiva estará sujeita e consequentemente maior será o fluxo de calor que a atravessa. Desta forma, a superfície externa receberá um fluxo de calor maior, logo a sua temperatura será maior [11]. Face a isto, não é de estranhar que o aumento da temperatura interior conduza a que existam menores condensações na superfície exterior [vd.Tabela 10]. No entanto, importa ressaltar que esta mudança no clima interior só surte efeito na temperatura da superfície exterior, se os materiais que compõem a secção transversal da parede não têm elevadas resistências térmicas.

Tabela 10 - Influência do clima interior no número de horas em que ocorrem condensações superficiais na superfície exterior

	Caso inicial (T=20°C)	T int=25°C
Nº de horas de condensações superficiais	151	137

### 6.3.3.3. *Humidificação na superfície exterior devido à chuva incidente sobre a fachada*

#### 6.3.3.3.1. *Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica*

Neste subcapítulo irá estudar-se a influência da chuva incidente [vd.4.2.2] sobre a fachada na humidificação da superfície exterior. Para tal será usada a mesma solução construtiva que se usou na análise de ocorrência de condensações superficiais, a solução ETICS. Os *inputs* são sensivelmente iguais ao caso inicial do subcapítulo 6.3.3.2 [vd.Anexo B - Tabela 5], tendo apenas duas diferenças: a consideração da quantidade da chuva e a não activação do "*Balanço radiativo explícito*" (desta forma não existem condensações superficiais, que podem influenciar a humidificação existente na superfície exterior).

Um exemplo prático deste tipo de anomalia está descrito na Ficha B09 da PATTORREB [17], onde está descrito um edifício que apresenta manchas de cor verde (desenvolvimento de microorganismos, nomeadamente algas) no seu revestimento externo de ligantes sintéticos, com maior intensidade nas fachadas voltadas a Norte e Poente. Seguidamente serão verificados se os resultados provenientes das simulações higrotérmicas realizados pelo WUFI estão em sintonia com os resultados obtidos na ficha da PATTORREB.

#### 6.3.3.3.2. *Resultados obtidos e respectivas análises*

No gráfico da Figura 35 está apresentado o teor de água no revestimento externo do sistema ETICS, para as quatro orientações geográficas principais, ao longo de um ano de simulação.

Ao visualizarem-se os resultados destaca-se a enorme volatilidade que o valor do teor de água apresenta em função da existência ou não da *quantidade de chuva incidente*. Esta volatilidade apenas surtirá efeito na camada externa de ligantes sintéticos, uma vez que a camada a seguir é o isolante térmico, EPS, de porosidade fechada (segundo o WUFI neste material não existe transporte de água líquida, pois  $D_w=0$  [vd.3.3.2]), mas que não impede

que haja uma quantidade de humidade significativa junto à superfície externa, podendo dar-se o desenvolvimento de microorganismos. Ao analisar o valor do teor de água que o revestimento externo apresenta, verifica-se que ao longo do ano os maiores valores ocorrem para a orientação Oeste e os menores para a orientação Norte. Este último resultado reitera os dados presentes no diagrama da chuva incidente para o ficheiro climático de Lisboa [vd.fig. 19].

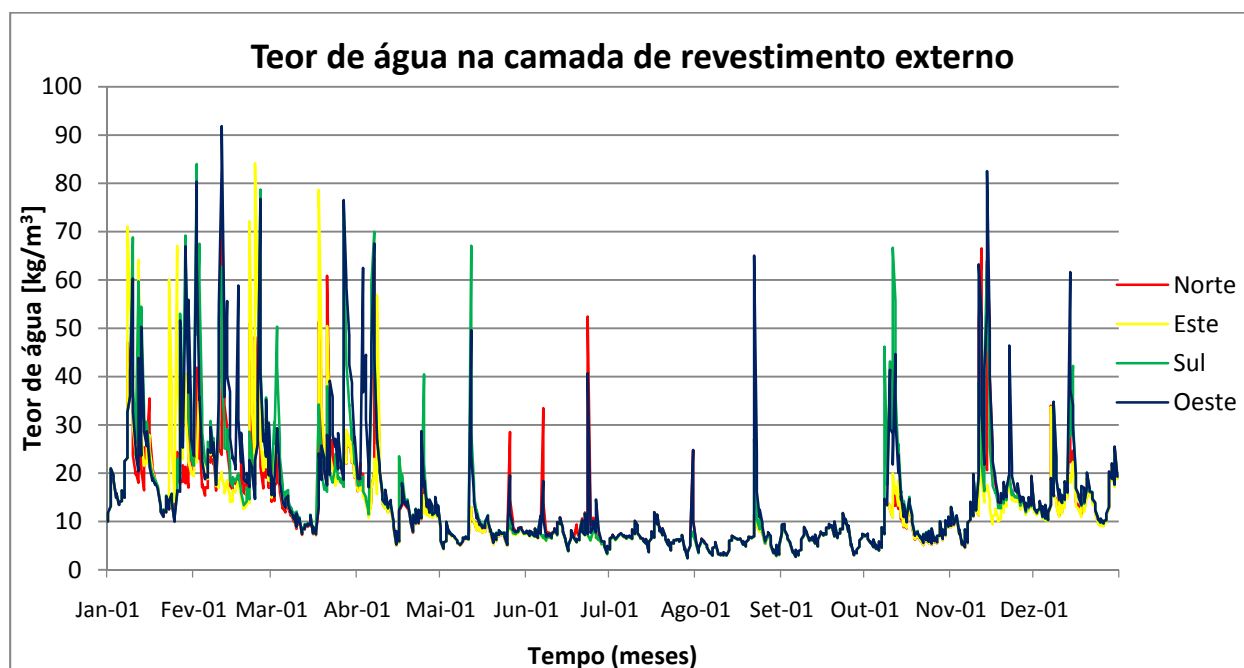


Figura 35 - Teor de água na camada de revestimento externo, para diferentes orientações geográficas

#### 6.3.3.4. Discussão dos resultados obtidos para a humedificação na superfície externa

Ao analisar a humedificação na superfície externa, constata-se que as orientações Norte e Poente são as que apresentam maior teor de humidade à superfície. Mas as razões que dão origem a este facto, diferem para cada uma destas orientações.

Na orientação Norte é possível constatar que o parâmetro que mais influencia o teor de humidade à superfície é a condensação superficial, enquanto na fachada Oeste a humedificação ocorre sobretudo devido ao efeito da chuva incidente [16]. Nas fachadas Sul e Este o efeito da secagem é mais intenso (devido à maior intensidade da radiação solar), atenuando o teor de humidade à superfície resultante de condensações superficiais e da chuva incidente [vd.fig. 36]. Assim, o desenvolvimento de microorganismos ocorre sobretudo nas

fachadas Norte e Oeste, porque o teor de humidade superficial mantém-se elevado por períodos de tempo mais prolongados. Por outro lado, importa referir que a cidade de Lisboa ao estar localizada no litoral de Portugal é propícia ao desenvolvimento de microrganismos [16], dada a especificidade do clima (temperatura amena e humidade relativa muito elevada ao longo de todo o ano).



fig. 36 – Análise da Humidificação em superfícies com diferentes orientações geográficas [3]





## **7. ANÁLISE DA QUANTIDADE DE HUMIDADE NOS PANOS DE ALVENARIA PARA DIFERENTES SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E MATERIAIS COM DIFERENTES PROPRIEDADES**

### **7.1. Introdução**

O teor de água elevado numa parede suscita vários problemas, nomeadamente menor resistência térmica, o que provoca perdas adicionais de energia e aumenta o risco de ocorrência de degradações. Face a esta conjuntura é necessário estudar soluções construtivas que tenham uma protecção eficaz à chuva incidente e ao aparecimento de condensações, de forma a resultar em menores valores de teor de água no pano de alvenaria. Este estudo é feito ao longo deste capítulo, e divide-se em três partes: na primeira verifica-se a influência do revestimento externo, na segunda o contributo do posicionamento do isolante térmico e na terceira parte abordam-se os de um forma conjunta os parâmetros das duas primeiras. Serão analisados casos de reabilitação, alteração das propriedades dos materiais ao longo do período de simulação (apesar do WUFI não ter em conta esta alteração nos seus modelos de cálculo) e será feita a comparação de valores obtidos em simulação com valores estabelecidos em normas ou artigos científicos.

### **7.2. Protecção à chuva incidente em soluções construtivas com revestimento externo à base de argamassas de ligantes minerais**

#### **7.2.1. Introdução**

Este subcapítulo é dedicado à protecção à chuva incidente dada pelos revestimentos exteriores às paredes de alvenaria. Esta problemática começou a ser estudada no ano de 1960 pelo Fraunhofer-Institute [45] com o objectivo de obter valores adequados de absorção de água (A) [vd.3.3.2] e limites de resistência à difusão de vapor de água (Sd) [vd.3.3.6] para o revestimento externo (rebocos de ligantes minerais), para que fosse garantida uma protecção adequada. Actualmente, valores adequados de A e Sd podem ser obtidos através de ferramentas validadas de cálculo higrotérmico (como é o WUFI), para qualquer zona climática.

A fim de relacionar a presença da humidade nos panos das paredes externas com as propriedades higrotérmicas da camada de revestimento exterior (reboco e pintura), os processos de humedecimento natural e de secagem devem ser analisados. Numa parede a variação do teor de água é determinada pelo equilíbrio entre a absorção de água (quando

existe precipitação) e a libertação da água subsequente (quando não há ocorrência de precipitação).

Quando a chuva incidente embate na fachada, forma-se sobre a superfície uma película contínua de água [45]. A absorção de água pelo revestimento exterior da parede é controlada pelo coeficiente de absorção de água -  $A$  ( $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{s}}$ ), que pode ser obtido experimentalmente [vd.3.3.2]. Assim a absorção de água pela fachada ( $m_{\text{abs}}$ ) durante um período de chuva incidente ( $t_{\text{rain}}$ ) pode ser descrita pela seguinte equação:

$$m_{\text{abs}} = A \times \sqrt{t_{\text{rain}}} \quad (7-1)$$

Uma vez que a chuva incidente cesse, as camadas superficiais exteriores serão secas rapidamente, estando reunidas as condições para dar início ao processo de secagem. Atendendo a que a interface entre o revestimento externo e a alvenaria podem constituir uma resistência ao fluxo de água líquida da alvenaria para o reboco, geralmente não é suficiente para manter o teor de água do reboco acima de um determinado valor que permita a ocorrência de condução capilar, o que faz com que o *coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição* ( $D_{\text{ww}}$ ) seja igual a zero [vd.3.3.2]. Portanto, a maior parte da humidade de precipitação absorvida pela parede, quando começa a migrar para o exterior (processo de secagem) tem que secar através do reboco por difusão de vapor de água. Assim, a resistência à difusão de vapor do revestimento é o principal parâmetro no processo de secagem de toda a parede. Esta resistência é tida em conta pela grandeza  $S_d$  [vd.4.2.3.1.2].

A quantidade de água que se evapora ( $m_{\text{dry}}$ ) durante um período típico de tempo seco ( $t_{\text{dry}}$ ) pode ser descrita de forma simplificada pela equação de difusão:

$$m_{\text{dry}} = \frac{\delta_{\text{air}}}{S_d} \times \Delta p(\theta; \varphi) \times t_{\text{dry}} \quad (7-2)$$

Com  $\delta_{\text{air}}$  ( $\text{kg}/[\text{m}^2\text{sPa}]$ ) sendo o coeficiente de difusão de vapor de água no ar e  $\Delta p$  (Pa) a diferença de pressão de vapor média entre a parte húmida da alvenaria em contacto com a parte interior do revestimento exterior e o ar exterior durante o período de secagem.

Para evitar qualquer acumulação de humidade numa parede exterior, o  $m_{\text{dry}}$  tem de ser superior ao  $m_{\text{rain}}$ . Portanto, da combinação da equação (7-1) com a equação (7-2) resulta a seguinte relação:

$$A \times S_d < \delta_{\text{air}} \times \Delta p(\theta; \varphi) \times \frac{t_{\text{dry}}}{\sqrt{t_{\text{rain}}}} \quad (7-3)$$

Assim, o produto entre  $A$  e  $Sd$  deve ser tal que a inequação acima seja respeitada. À excepção de  $\delta_{air}$  que é um parâmetro constante<sup>33</sup>, os períodos típicos de chuva ( $t_{rain}$ ) e secagem ( $t_{dry}$ ), bem como a diferença de pressão de vapor média durante os períodos de secagem, dependem do clima local. Uma vez que é bastante difícil determinar os parâmetros dependentes do clima separadamente, eles são agrupados, obtendo-se um valor constante para o coeficiente de protecção à chuva incidente  $C_{RP}$ . Assim, a equação (7-3) pode ser representada pela condição:

$$A \times Sd < C_{RP} \quad (7-4)$$

$C_{RP}$  pode ser obtido a partir de testes de campo [45], através de medições de  $A$  e  $Sd$  para os revestimentos externos que permitam a construção dum gráfico [vd.fig. 37] com uma curva que separa os revestimentos com bom e mau desempenho, no que refere à protecção da envolvente da acção da chuva incidente.

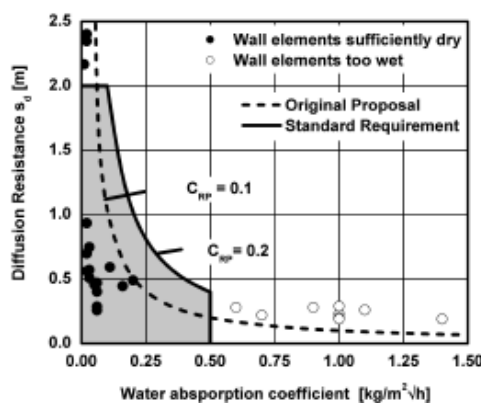


fig. 37 - Definição da curva de separação de elementos com bom e mau desempenho na protecção à chuva incidente [45]

A classificação dos revestimentos externos [vd.fig. 37] baseia-se na avaliação da presença de humidade nos elementos de fachada expostos à orientação crítica (a que tem maior *quantidade de chuva incidente*). Se estes elementos virados para a orientação crítica têm condições de secagem apropriadas (diminuição significativa do teor de água ao longo do tempo), as outras orientações também terão, podendo-se considerar que a protecção à chuva incidente oferecida pelo revestimento externo é adequada.

<sup>33</sup> A dependência do coeficiente de difusão de vapor de água no ar pela pressão e temperatura ambiente pode ser desprezada nesta análise [45].

A curva na fig. 37 (ver "zona cinzenta"), definida com o coeficiente  $C_{RP}$  igual 0,2 kg/(m $\sqrt{h}$ ), constitui um limite de desempenho adequado na protecção à chuva incidente de revestimentos externos para o padrão alemão [9]. Uma vez que a chuva incidente pode não ser a única fonte de humidade nas paredes, a resistência à difusão de vapor da camada exterior de superfície deve ser limitada, mesmo se não houver absorção de água da chuva. Assim, define-se um valor máximo para Sd de dois metros [45]. Existe um limite semelhante para o valor do coeficiente de absorção (A), que não deve ser muito alto, mesmo se o potencial de secagem é suficiente para garantir a secagem da parede, devido a exigências de desempenho térmico. Face a isto, o valor de A não pode exceder 0,5 kg/(m $^2\sqrt{h}$ ).

Em suma, os objectivos deste subcapítulo serão averiguar se os limites de A e Sd estabelecidos para a Alemanha podem ser aplicados numa região com um clima bastante diferente, como é o caso de Lisboa, e desta forma descobrir quais as propriedades que um revestimento externo de uma parede exterior deve ter de modo a garantir uma protecção adequada à chuva incidente em fachadas com a orientação crítica na zona de Lisboa. Atendendo a que se utiliza uma ferramenta numérica, inúmeras combinações são testadas. Esta é a grande vantagem, quando comparando com os testes de campo, que são caros e demorados [33].

### **7.2.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica**

Os *inputs* usados para esta simulação estão no Anexo B - Tabela 6. No entanto é importante salientar alguns, nomeadamente o conjunto de valores testados para A e Sd. A orientação escolhida é a Sudoeste, dado ser a orientação crítica para a zona de Lisboa. Quanto aos coeficientes de chuva incidente considera-se a situação mais gravosa ( $R_1=0$  e  $R_2=0,2$ ) [vd.Anexo B - Tabela 6], atendendo a que a variável *quantidade chuva incidente* tem um peso considerável nos resultados que serão posteriormente analisados. A solução construtiva é uma alvenaria de pano simples de blocos de betão celular autoclavado com uma espessura igual a 22 cm, rebocada em ambos os lados.

### **7.2.3. Resultados obtidos e respectivas análises**

#### **7.2.3.1. Revestimentos externos com diferentes valores de coeficientes A e Sd**

Ao visualizar o gráfico do teor de água da camada de blocos de betão celular autoclavado [vd.fig. 38], verifica-se que existe uma situação em que o teor de água da solução aumenta o seu valor ao longo do período de simulação (caso da simulação com  $A=1$

kg/(m<sup>2</sup>√h) e Sd=0,4m) e outras três soluções em que a diminuição do teor de água é inexistente ou muito pouco significativa (casos das simulações: A=0,75 kg/(m<sup>2</sup>√h) e Sd=0,4m / A=0,25 kg/(m<sup>2</sup>√h) e Sd=1,2m / A=0,25 kg/(m<sup>2</sup>√h) e Sd=1,6m). Para estes quatro casos, apesar de apresentarem graus de gravidade diferentes, podem ser classificados como inapropriados sob o ponto de vista de garantirem condições de secagem ajustadas. Contudo, face aos resultados obtidos, pode-se concluir que os limites estabelecidos para A e Sd (área a cinzento do gráfico da fig. 37) através dos ensaios realizados pelo Fraunhofer-Institute se adequam na íntegra.

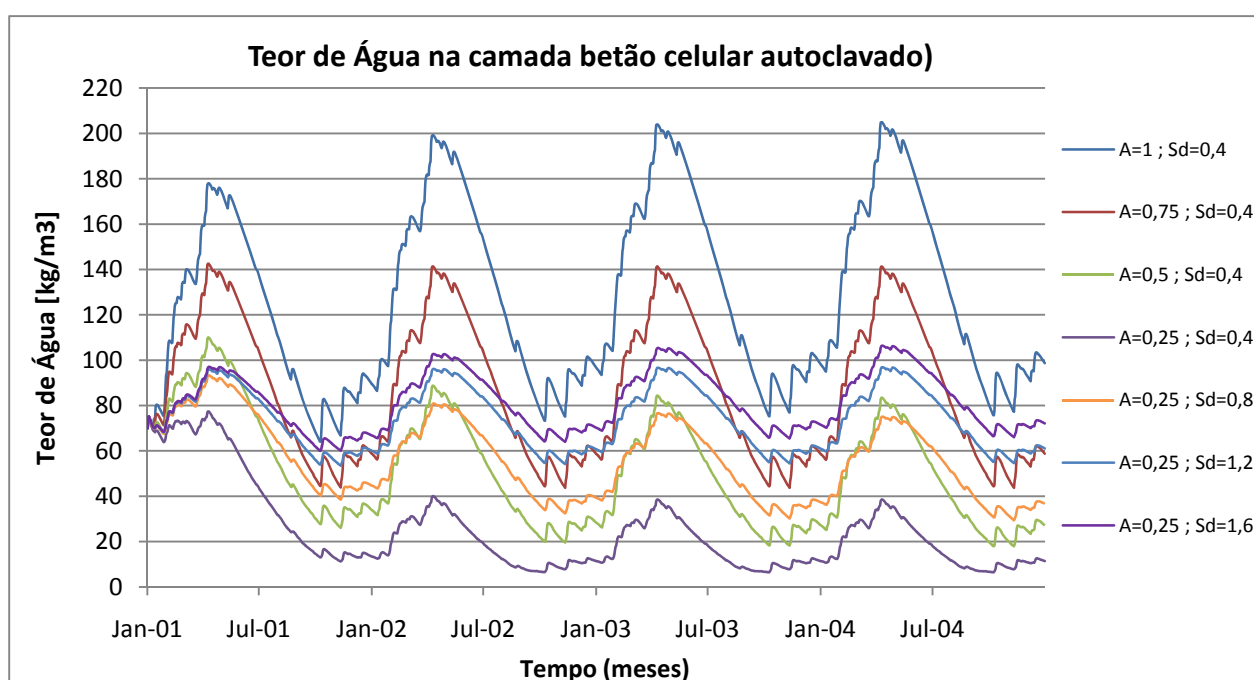


fig. 38 - Teor de água na camada de betão celular autoclavado para um conjunto de valores de A e Sd para o revestimento externo

Analisando a influência dos valores de A e Sd, verifica-se que para soluções construtivas que apresentem o mesmo valor do produto de A e Sd (ou seja, o mesmo valor de  $C_{RP}$ ), as soluções construtivas com maior valor de A terão um teor de água mais elevado ao longo de todo o período de simulação [vd.fig. 38]. Face a isto, conclui-se que A tem um maior peso que Sd no valor do teor de água no pano de alvenaria. A explicação passa pela relação exponencial entre o *coeficiente de transferência de água líquida por sucção* ( $D_{ws}$ ) [vd.3.3.2] e o teor de água. Soluções que apresentem revestimentos externos com elevados valores de A, terão uma maior quantidade de absorção de água pelo revestimento externo, conduzindo ao aumento exponencial do seu *coeficiente*  $D_{ws}$ , resultando num maior transporte de água líquida para a camada de blocos de betão celular, tal facto pode ser verificado numericamente

através da equação de equilíbrio de humidade (equação 2-1). Já no que refere ao valor de  $S_d$ , um aumento deste parâmetro está associado também a um aumento de  $\mu$  [vd.3.2.5], através de uma relação linear e não exponencial. Na equação de equilíbrio de humidade (equação 2-1) aparece o coeficiente de permeabilidade ao vapor ( $\delta_p$ ), que é inversamente proporcional a  $\mu$ . Assim, um aumento de  $S_d$  é equivalente a uma redução de  $\delta_p$  que tem como resultado uma diminuição da difusão de vapor e consequentemente haverá uma menor diminuição da derivada do teor de água em relação ao tempo (numa situação de secagem). No entanto, a menor redução do teor de água na fase de secagem é de magnitude menor, quando comparado com o aumento do teor de água provocado pelo aumento de  $A$  numa fase de ocorrência de precipitação.

Ao observar a solução construtiva na totalidade, constata-se que não existe nenhum material que crie uma barreira à passagem da água, pois todas as camadas permitem o transporte de água líquida ( $D_{ws}$  não é nulo) e o coeficiente de absorção do revestimento externo também não é nulo. Desta forma, grandes quantidades de água que são absorvidas pela superfície exterior da parede chegarão ao seu paramento interno [vd.fig.39], levando a um aumento da humidade relativa, associado ao risco de proliferação de fungos [vd.6.2.4].

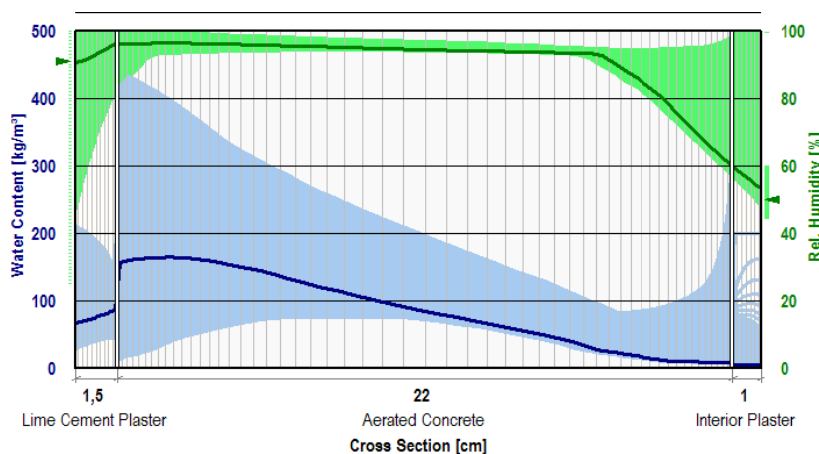


fig.39 – Teor de água ao longo da secção transversal, para o caso de  $A=1\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$  e  $S_d=0,4\text{m}$

Perante o referido anteriormente, é necessário arranjar soluções que permitam solucionar o problema da ocorrência de valores altos de teor de água ao longo de toda a solução construtiva. No capítulo 7.2.3.3 serão analisadas estas soluções.

### 7.2.3.2. *Influência de um aumento anual do coeficiente de absorção do revestimento externo*

Neste subcapítulo pretende-se expor os resultados provenientes de uma simulação higrotérmica que tenha em conta um aumento anual do coeficiente de absorção (A) da camada de revestimento externo ao longo do período de cálculo. Este aumento reflecte o envelhecimento que o revestimento externo, neste caso um reboco à base ligantes minerais, tem com o decorrer do tempo. Este envelhecimento, associado ao aparecimento de fissuração (que se agrava com o decorrer do tempo), provoca o aumento do coeficiente de absorção (A). Na Tabela 11 estão descritos de uma forma sucinta os fenómenos que podem originar fissuração (exógena ou endógena ao reboco).

Tabela 11 - Causas que dão origem à ocorrência de fissuração [26]

Anomalia	Ocorrência	Exemplos/ Causas
Fissuração exógena ao Reboco	Cedências na estrutura dos edifícios / sismos	- Movimentações diferenciais das fundações, devido às variações da humidade do solo - Deformação sofrida pelo pavimento superior
	Fissuração Obliqua	- Na zona dos vãos (zona de concentração de tensões)
	Ausência de tratamento nas zonas de transição	- Não colocação de uma rede de fibra de vidro entre a alvenaria e o elemento estrutural
	Desligamento de elementos dos edifícios	- Entre a zona de alvenaria e a estrutura, devido ao seu diferente comportamento.
	Vibrações: abertura de roços, de vãos, etc.	- Aberturas de roços para colocação de tubagens
	<i>Solicitações higrotérmicas</i>	<i>-Expansões da parede confinada, devido à acção do calor e acção da humidade</i>
Fissuração endógena ao Reboco	Defeitos decorrentes do Suporte	- Existência de um reboco frágil, pois o ligante não foi suficientemente hidratado devido à aplicação sobre suporte seco
	Retracção do reboco durante a cura	- Fenómeno de retracção pode ser agravado se existir um excesso de ligante na formulação, ou se houver uma secagem demasiado rápida.
	Fissuração horizontal	- Insuficiente aderência ao suporte, má formulação da argamassa ou uma sobreespessura do reboco.

A determinação de um valor que caracterize o aumento de A não tem uma solução única, dada a enorme variabilidade das variáveis que estão inerentes a este aumento. Porém, optou-se pelo valor de 25% para o aumento anual, valor obtido em amostras de campo efectuadas pelo Fraunhofer-Institute na cidade de Munique [33]. Deve-se ter como ressalva, que as condições meteorológicas de Munique são bastantes distintas das que ocorrem em Lisboa, existindo assim um nível diferente de gravidade em algumas das ocorrências referidas na Tabela 11, particularmente no que diz respeito às solicitações higrotérmicas. No entanto, o

valor de 25%, aparece como sendo válido de uma forma geral, ou seja, pode ser aplicado em simulações de diferentes zonas, não se restringindo a Munique.

Para poder analisar a influência do aumento de  $A$  no valor do teor de água da alvenaria é feita a simulação de uma alvenaria com um reboco exterior que respeite as limitações indicadas pelo Fraunhofer-Institute [vd.7.2.1], para que este apresente um comportamento adequado. Assim, escolheu-se um valor de  $A$  igual  $0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$  e um  $S_d$  igual a 0,4 metros. No outro caso simulado o  $S_d$  permaneceu com o mesmo valor, diferindo apenas o valor de  $A$ , que tem um aumento de 25% por ano, ao longo dos quatros anos simulados.

Ao nível de execução da simulação no programa, importa destacar que os *outputs* são obtidos com o mesmo procedimento que nos casos anteriores, já os *inputs* são colocados com um outro tipo de procedimento. Neste caso, divide-se o período de cálculo de quatro anos em quatro simulações higrótérmicas, sendo que o *output* de uma é o input da posterior, ou seja, os *outputs* do primeiro ano de simulação são os *inputs* da simulação do segundo ano e assim sucessivamente. Para isto é escolhida no menu das *condições iniciais* [vd.4.2.4], a opção obter as condições iniciais de teor de água e temperatura a partir de um ficheiro externo.

O resultado final do teor de água na alvenaria de blocos de betão celular autoclavado para o período de cálculo de quatros anos está exposto na fig. 40.

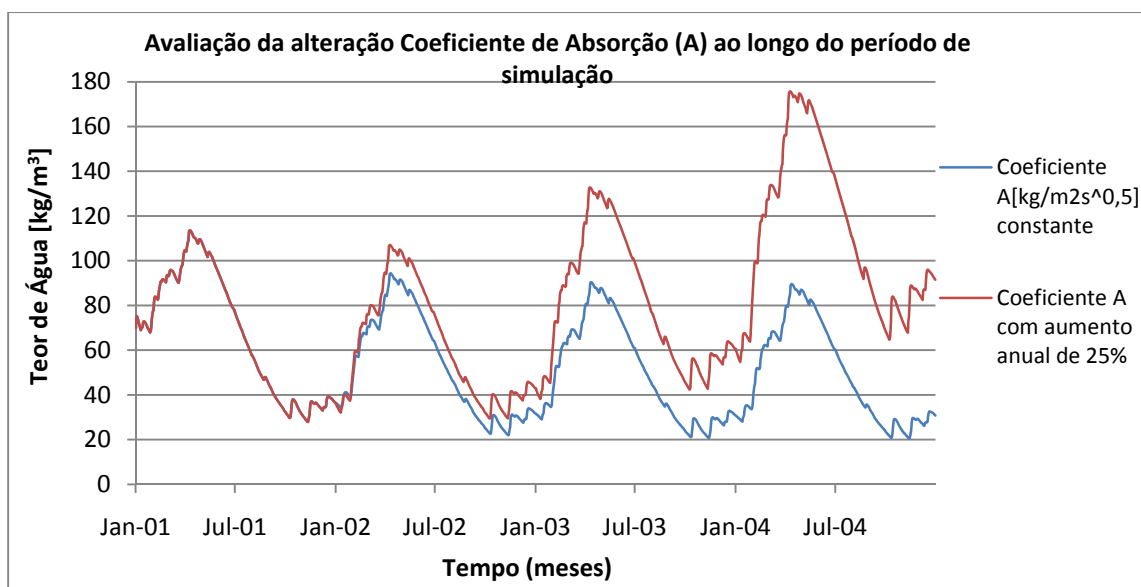


fig. 40 - Avaliação da alteração do Coeficiente de Absorção ( $A$ ) no teor de água da alvenaria  $[\text{kg/m}^3]$  ao longo do período de simulação

Estes resultados mostram de uma forma evidente, que existe uma diferença significativa no valor do teor de água na alvenaria entre a consideração ou não do aumento anual do valor de  $A$ , pelo que deverá ser avaliado de forma rigorosa.



Na solução em que o valor de A é constante ao longo do período de cálculo, nota-se um ligeiro decréscimo do teor de água na alvenaria (basta observar os valores máximos para cada ano de simulação), assim as condições de secagem estão garantidas. Em relação à outra solução observa-se o inverso, isto é, um aumento do teor de água ao longo do período de simulação.

Uma análise mais minuciosa ao aumento do teor de água máximo anual no pano de alvenaria [vd.Tabela 12], permite verificar que este aumento é cada vez maior. A explicação para este sucedido é devido ao aumento anual do valor de A, que dá origem a um aumento considerável do valor do *coeficiente de transferência de água líquida* (Dws) [vd.3.3.3]. Dada esta situação, o acréscimo da quantidade de água absorvida pelo revestimento exterior (devido a um maior valor de A), resultará num transporte de água cada vez maior para a zona de alvenaria (neste caso blocos de betão celular autoclavado), consequentemente de ano para ano obtém-se maiores aumentos do teor de água máximo anual [vd.fig. 40].

Tabela 12 - Valores máximos do teor de água para a situação do aumento anual de 25% do coeficiente de absorção

Valores Máximos do teor de água [kg/m <sup>3</sup> ]		Aumento do teor de água em relação ano anterior [%]
1ºano	113,6	-
2ºano	115,0	1,8
3ºano	137,8	19,8
4ºano	179,7	30,4

### 7.2.3.3. Avaliação de soluções com vista à redução do teor de água na parede

#### 7.2.3.3.1. Fase de concepção para construção de um edifício novo

No subcapítulo 7.2.3.1 avaliou-se de que maneira os valores de A e Sd do revestimento externo influenciam o valor do teor de água na alvenaria. Em qualquer um dos casos estudados, a ocorrência de degradações no paramento interno está sempre presente. Para eliminar estas anomalias é necessário garantir que a humidade vinda do exterior não atinja a superfície interior, devendo-se pensar em outras soluções que garantam uma protecção adequada à chuva incidente.

A solução que servirá como caso inicial é uma das estudadas em 7.2.3.1, tem um revestimento externo com  $A=1 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$  e  $S_d=0,4\text{m}$ . Como se viu em 7.2.3.1 esta solução não garante condições de secagem apropriadas e apresenta valores elevados de teor de água no

paramento interno, resultando nas anomalias já referidas. De seguida serão apresentadas duas soluções que se pretendem como alternativa numa fase de concepção. Numa das soluções, com o intuito de melhorar o grau de protecção a chuvas incidentes irá reduzir-se a absorção de água do revestimento externo (reboco), através da adição de um hidrófugo de massa<sup>34</sup> à sua composição, que reduz a sucção capilar.

Actualmente existem no mercado gamas de rebocos hidrofugados, com características melhoradas ao nível da penetração de água, devido a uma redução da capilaridade da matriz cimentícia. Um exemplo deste tipo de reboco é o reboco hidrófugo da empresa Lafarge [6].

O procedimento que se fez no WUFI para ter em conta a aplicação do produto hidrófugo foi colocar o *coeficiente de transferência de água líquida sucção* ( $D_{ws}$ ) e o *coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição* ( $D_{ww}$ ) a zero [vd.3.3.2], ou seja, eliminou-se qualquer transporte de água líquida no revestimento externo, tanto para a fase de absorção como de secagem. Em relação à difusão de vapor de água, nenhum valor das propriedades relacionadas com esta foi alterada.

Na outra solução alternativa, pretende-se distanciar a humidade que vem do exterior do paramento interno, estudando a influência da espessura da parede.

Após uma leitura dos resultados obtidos [vd.fig. 41], conclui-se que a solução de reboco hidrofugada é a melhor opção, uma vez que existe uma redução substancial do teor de água ao longo do período de simulação, devido à absorção de água ser nula. No que refere ao período de secagem da parede, este proporciona a redução do teor de água, apesar de as condições de secagem ficarem menos favoráveis, uma vez que o  $D_{ww}$  é nulo, obrigando toda a água contida na alvenaria a atravessar o reboco por difusão, que é muito menos eficiente que o transporte de humidade por sucção capilar [vd.3.3.2].

---

<sup>34</sup> Hidrófugo é um produto incolor, impermeável à água líquida mas permeável ao vapor de água; a razão de este ser de massa é devido ao facto de fazer parte da composição do material [29].

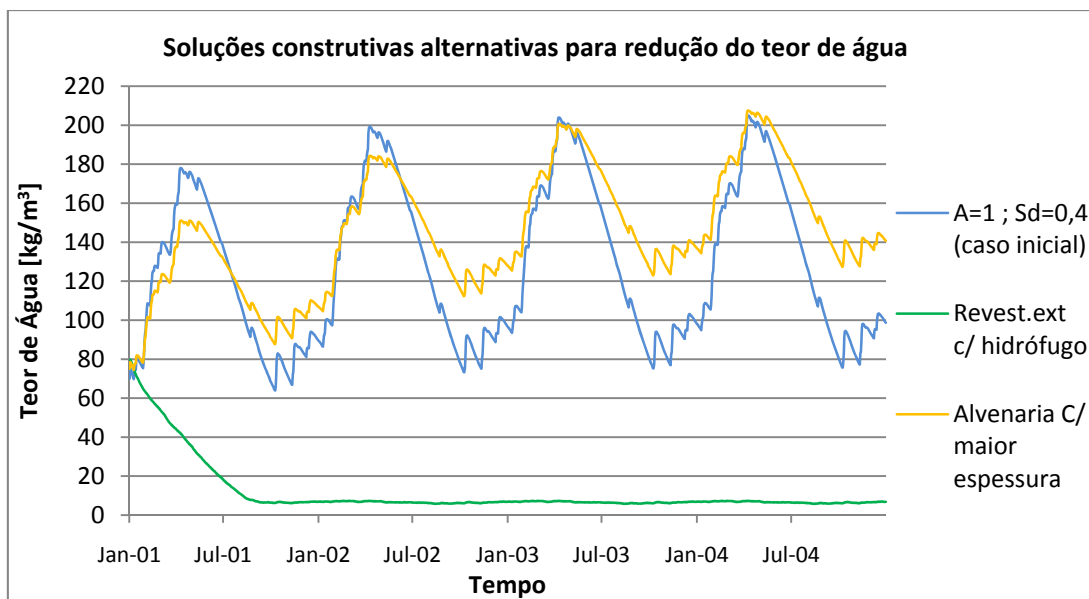


fig. 41 - Soluções construtivas alternativas para obter redução do teor de água no pano de alvenaria e paramento interno da parede

Em relação à solução construtiva que apresenta uma maior espessura do pano de alvenaria, pelos resultados obtidos [vd.fig. 41] conclui-se que não é uma solução vantajosa se o objectivo for a redução do teor de água na parede. A razão é que à semelhança com a solução inicial, continua a não haver nenhuma camada que crie a barreira ao transporte de água líquida (sucção capilar) desde o exterior até à alvenaria. Apesar disto, existem duas vantagens em aumentar a espessura da alvenaria: uma é a redução do teor de água no paramento interno, permitindo deste modo eliminar o risco de ocorrência de proliferação de fungos (como se pode ver na fig. 42 em nenhum período da simulação existem pontos acima da curvas LIM BII [vd.4.5.3]); a outra vantagem é o aumento da resistência térmica, que é directamente proporcional à espessura da parede.

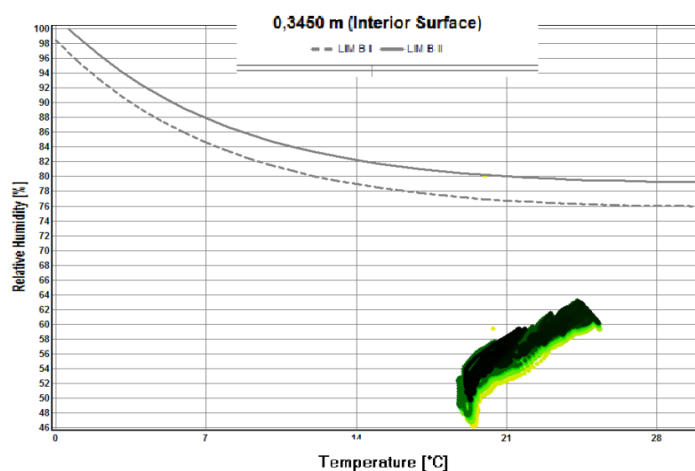


fig. 42 - Análise do risco de ocorrência de proliferação de fungos no paramento interno da parede exterior

#### 7.2.3.3.2. Fase de concepção para a reabilitação de um edifício

Neste subcapítulo é analisada uma solução para um caso de reabilitação de um edifício, através da realização de uma simulação composta por duas fases, que perfazem um total de oito anos. A primeira fase corresponde aos primeiros quatro anos. Esta fase é igual ao caso inicial do subcapítulo 7.2.3.3.2. Como foi referido, é uma solução que não garante condições de secagem apropriadas, como tal, no fim do quarto ano colocou-se um produto hidro-repelente no reboco [55], que deve impedir a passagem de água e ser permeável ao vapor de água. O procedimento no WUFI foi um pouco diferente do realizado anteriormente para o reboco hidrófugado [vd.7.2.3.3.1]. Enquanto que para o reboco hidrófugado se considerou nulo o transporte de água líquida para toda a camada, neste caso considerou-se apenas que superficialmente a quantidade de água absorvida seria menor, através da diminuição do *factor de absorção da chuva incidente* [vd.4.2.3.1.5]. Com este procedimento, tentou-se aproximar ao máximo a simulação à realidade, que neste caso é apenas a aplicação de um hidrófugo de superfície.

Pela fig. 43 observa-se que o hidrófugo de superfície dá origem a uma redução do teor de água, pois, uma parede que numa primeira fase apresentava uma evolução do teor de água ascendente, após aplicação do produto, esta evolução inverte-se, começando então a sua fase de secagem.

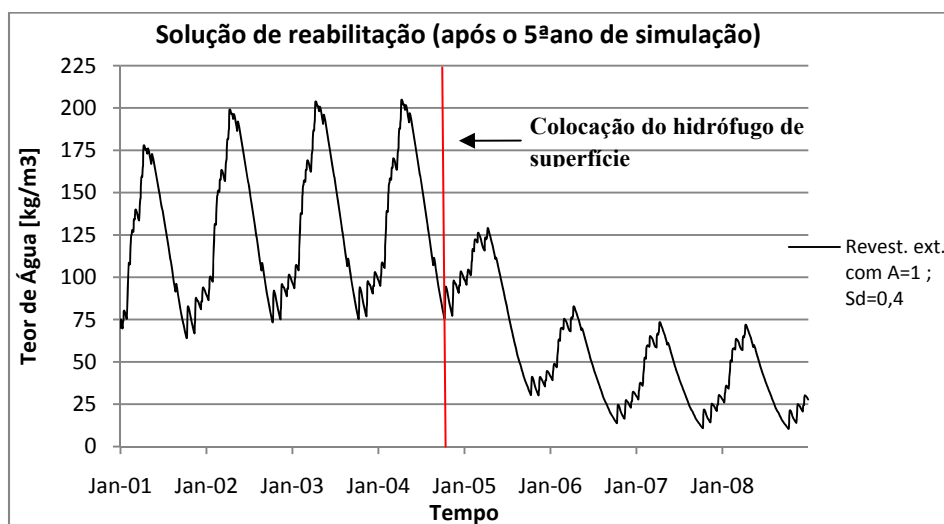


fig. 43 – Evolução do teor de água numa parede com duas fases: sem e com hidro-repelente na superfície do revestimento externo

#### 7.2.3.3.3. *Análise de modelação computacional no WUFI para a aplicação do hidrófugo*

Nos subcapítulos 7.2.3.3.1 e 7.2.3.3.2 foram simuladas soluções construtivas em que se recorreu à aplicação de produtos hidrófugos. Seguidamente serão feitas algumas considerações aos resultados obtidos para estas soluções, e será analisada a veracidade quanto ao facto de estas simulações espelharem na íntegra o que ocorre na realidade.

- **Solução com revestimento externo hidrófugado** [vd.7.2.3.3.1]: quando simulada no WUFI parece ser uma solução ideal, pois apresenta uma redução contínua do teor de água, no entanto existem vários pormenores que a podem tornar menos favorável. O primeiro é ao nível dos pressupostos assumidos na formulação da simulação higrotérmica. Nesta considerou-se que a colocação de um reboco hidrófugado iria eliminar o transporte de água líquida (o que fez eliminar a absorção de água), mas não se considerou um aumento da resistência à difusão de vapor, que na realidade acontece e ao ser tida em conta iria afectar as condições de secagem. Esta questão do aumento da resistência à difusão de vapor criada pela aplicação de um revestimento externo hidrófugado é ainda mais grave, se considerarmos que na realidade podem surgir outras fontes de humidade (caso da humidade ascensional), que não só a proveniente da precipitação e que não foram contabilizadas nesta simulação. Por último, importa também realçar que este tipo de intervenções nunca dão origem a um total impedimento da passagem de água, pois existem sempre zonas da envolvente em que o produto não foi tão bem aplicado, ou mesmo que tenha sido, poderão existir fissuras consideráveis que não permitam a criação de uma barreira estanque à passagem da água [29].

Atendendo ao que se referiu anteriormente, pode-se concluir que esta solução construtiva com revestimento externo hidrófugado nunca terá um desempenho tão favorável, como aquele que se obtém pela simulação numérica.

- **Solução de reabilitação com aplicação de hidrófugo de superfície** [vd.7.2.3.3.2]: é uma solução que resolve o problema de soluções construtivas com condições de secagem inadequadas [vd.fig. 43.], no entanto é importante fazer algumas considerações. A primeira é uma solução paliativa, como tal ao fim de algum tempo preciso de novamente ser aplicada [29]. Outro aspecto importante é que o facto de ser aplicado apenas superficialmente permite que haja uma migração da água desde o interior até à superfície, não conseguindo depois atravessá-la e migrar para o exterior. Assim, em paredes que tenham sais, estes cristalizam antes de chegar à superfície, fenómeno designado por criptoflorescências [vd.fig. 44]. O nível

de risco de ocorrência de criptoflorescências, que está associado ao destacamento do revestimento externo, é mais elevado quanto maior for a resistência à difusão de vapor por parte do revestimento externo hidrófugado e quanto maior for a presença de sais higroscópicos. Para agravar mais a situação, deve notar-se que uma elevada presença de sais na alvenaria pode dificultar o processo de secagem [43].

Para esta situação, há um recuo da frente húmida [vd.fig. 44], o que implica que a humidade existente na parede não consiga migrar até ao exterior em fase líquida, sendo obrigada a migrar a partir da posição da frente húmida por difusão. Isto contribui para que a cristalização dos sais ocorra antes de chegar à superfície. Desta forma pode-se concluir que em paredes que tenham a presença de sais à superfície, após aplicação do produto hidrófugo, existe o risco de passar a existir o fenómeno de criptoflorescências, em vez de eflorescências<sup>35</sup> [27].

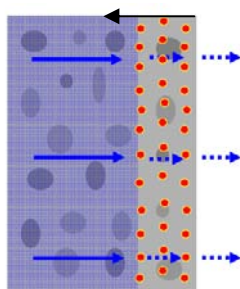


fig. 44 – Recuo da frente húmida devido à aplicação do hidrófugo de superfície originando criptoflorescências [27]

### **7.3. Colocação do isolante térmico e aplicação de hidrófugo na envolvente exterior no comportamento higrotérmico de paredes expostas à chuva incidente**

#### **7.3.1. Introdução:**

A presença de um elevado teor de água numa parede, devido ao impacte da chuva incidente, além de reduzir a resistência térmica da parede, pode levar a danos provocados pela geada ou acelerada deterioração da fachada. Portanto, devem ser tomadas medidas de colocação de isolante térmico a fim de melhorar o comportamento higrotérmico do edifício. A influência do isolamento exterior e do interior sobre o comportamento higrotérmico das paredes irá ser determinada através da realização de simulações higrotérmicas no programa WUFI.

---

<sup>35</sup> Cristalização dos sais à superfície[27].

Vários autores como *Künzel* defendem que a melhor colocação de isolante numa parede é a aplicação pelo exterior da fachada [38]. No entanto, isto pode ser dispendioso ou inadmissível porque a fachada original poderá ter que permanecer inalterada por razões estéticas ou históricas. Nesses casos, a única alternativa possível é um isolamento interior da parede, que tem como consequências uma diminuição da temperatura da alvenaria, provocando uma redução da secagem da humidade de precipitação. De facto, existe uma relação entre a temperatura e a capacidade de secagem da parede (material higroscópico). As razões para tal relação são as seguintes:

- Uma maior temperatura dentro de um material origina uma redução da humidade relativa. Face a isto, e uma vez que em materiais higroscópicos existe uma relação (dada pela *curva de armazenamento de humidade* [vd.3.3.1]) entre o teor de água e a humidade relativa (mesmo para valores abaixo do limite de saturação), pode-se concluir que uma maior temperatura vai originar menores valores de teor de água, havendo uma maior capacidade de secagem.

- Uma maior temperatura origina uma maior taxa de *desadsorção* [vd.3.3.1], o que é equivalente a dizer que existe um menor número de moléculas de água fixadas às paredes dos poros do material, logo aumenta a capacidade de difusão da parede, pois quanto menos moléculas de água estão fixadas às paredes, mais volume de ar nos poros existe para ocorrer o processo de difusão.

- Face ao que foi referido no primeiro tópico, e atendendo à relação exponencial entre os *coeficientes de transferência de água líquida* [vd.3.3.2] e o teor de água (ou humidade relativa), pode-se dizer que maior temperatura poderá reduzir substancialmente o *coeficiente de transferência de água líquida por sucção* ( $D_{ws}$ ) [vd.3.3.2], que é um dos termos da equação de equilíbrio de humidade (equação 2-1). Este aspecto é especialmente importante no caso de ocorrência de precipitação, pois conduzirá a que um transporte de água capilar (que depende directamente do valor de  $D_{ws}$ ) proveniente da acção da chuva seja menor ao longo do material.

Analisando os cálculos de transferência de calor e transporte de humidade, estudar-se-á neste tópico o efeito no comportamento higrotérmico das paredes de tijolo, devido a diferentes localizações do isolamento.

### **7.3.2. Comportamento higrotérmico da parede mediante o posicionamento do isolante térmico**

#### **7.3.2.1. Dados introduzidos para a realização da simulação higrotérmica**

Em traços gerais, no que refere à simulação, primeiramente a parede estará exposta e não isolada, considerando-se posteriormente a influência da colocação de um sistema de isolamento pelo exterior e interior.

Os inputs utilizados para esta simulação higrotérmica estão no Anexo B - Tabela 7. De salientar que a solução construtiva é uma parede com um pano de alvenaria de tijolo cerâmico com reboco interior e exterior e uma espessura total de 29 cm, que servirá como caso padrão para as soluções construtivas posteriores com isolamento térmico. Os isolantes usados foram o EPS e a lã mineral.

No que refere aos dados do clima exterior, dispõe-se dos dados meteorológicos indicados no capítulo 5, para a orientação Sudoeste. A temperatura e humidade relativa interior são obtidas pela norma EN15026 [vd.4.4.2.4]. No que refere à humidade relativa escolheu-se também a opção *normal moisture load* dentro do menu EN15026. Os cálculos são realizados para três anos, de forma a obter dados meteorológicos suficientes para que se atinja um equilíbrio de humidade dinâmico. Este equilíbrio pode ser analisado através da visualização de um gráfico *profile* [vd.2.4], onde se pode visualizar o teor de água, ao longo da secção transversal da parede.

#### **7.3.2.2. Resultados da evolução do teor de água no pano de alvenaria**

##### **7.3.2.2.1. Solução com isolamento pelo exterior**

Os resultados obtidos mostram que um sistema de isolamento pelo exterior é uma forma muito eficaz de protecção à chuva incidente. Os *courses* [vd.2.4] do processo de secagem do pano simples de alvenaria cerâmica exposta com a colocação de isolante pelo exterior são mostrados na fig. 45. Neste caso são apresentadas quatro soluções, duas com EPS e as restantes com lã mineral. Para cada tipo de isolante utilizaram-se as espessuras de 4 e 6 cm.

Os resultados revelam que as soluções com lã mineral têm uma secagem mais rápida, comparativamente às soluções com EPS. Isto é bem visível no primeiro ano, especialmente nos meses de Verão. Por exemplo, no mês de Agosto, para as soluções com lã mineral os valores médios para o teor de água são de  $4,5\text{kg/m}^3$ , enquanto para as soluções com EPS, os valores médios são de  $7\text{ kg/m}^3$ .



Da Tabela 13 observa-se que para a espessura de 4cm de isolante térmico (EPS e lã mineral), se obtém diferenças médias para o primeiro ano de 13% e de 16,62% para a espessura de 6cm. Estas diferenças reduzem-se se o período de avaliação aumentar para três anos. O motivo para a diferença significativa nos valores de teor de água é a diferença dos valores de resistência à difusão de vapor de água ( $\mu$ ) dos dois isolantes. Enquanto as soluções com lã mineral apresentam um valor de 1.3, as soluções com EPS apresentam um valor de  $\mu$  igual a 30. Atendendo a que o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água ( $\delta_p$ ) de um material é uma das variáveis que entra na equação de equilíbrio de humidade (equação 2-1), materiais com diferentes resistências à difusão de vapor, terão obrigatoriamente valores distintos de teor de água no pano de alvenaria cerâmica ao longo do período de simulação, ou seja, terão diferentes taxas de secagem.

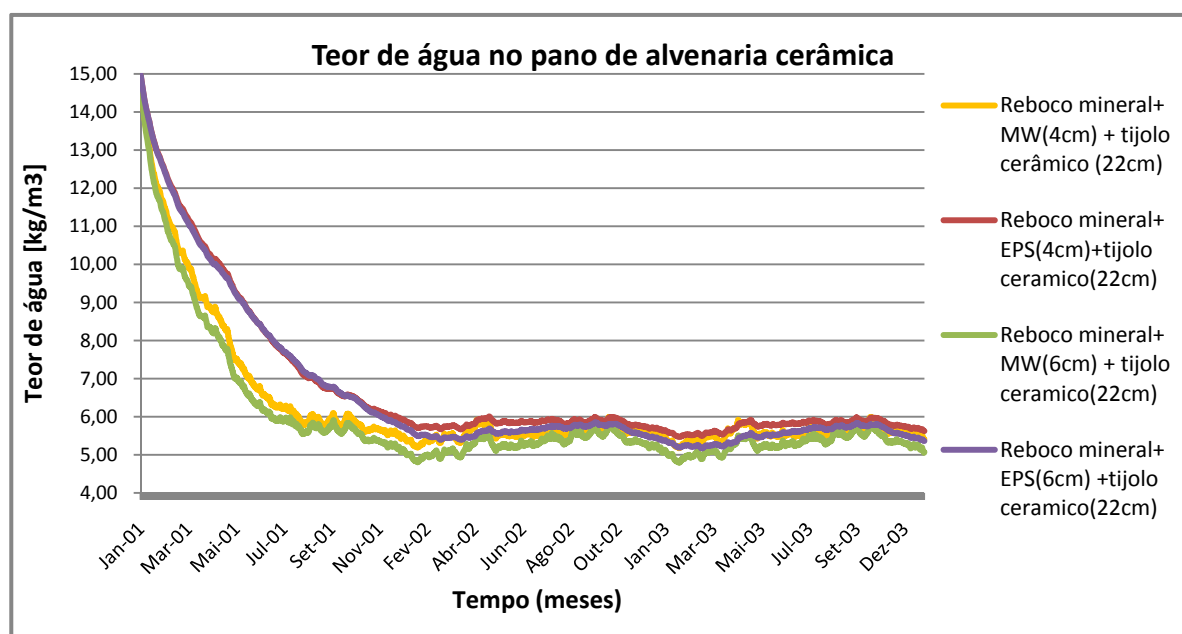


fig. 45- Evolução do teor de água no pano simples de alvenaria cerâmica para diferentes sistemas de isolamento térmico

A lã mineral ao apresentar uma resistência à difusão de vapor muito mais baixa que o EPS permite-lhe obter maiores taxas de difusão de vapor. No caso da lã mineral, a difusão de vapor dá-se nos dois sentidos: exterior e o interior. Tal facto pode ser visto no *profile* de teor de água da lã mineral [vd.fig. 46], onde o máximo valor se dá sensivelmente a meio da parede, reduzindo-se depois nos dois sentidos a curva do teor de água. Já no caso da colocação do EPS, a maioria da difusão de vapor dá-se apenas em direcção ao interior, pois no *profile* de teor de água do EPS [vd.Anexo C - Fig 9], o máximo valor que se obtém a meio da parede, apenas sofre uma redução significativa em direcção ao interior. Atendendo ao que

foi referido, o facto de a solução construtiva com lã mineral atingir mais depressa o equilíbrio higroscópico (curva do teor de água atingir um valor constante ao longo da secção transversal da alvenaria) é perfeitamente perceptível.

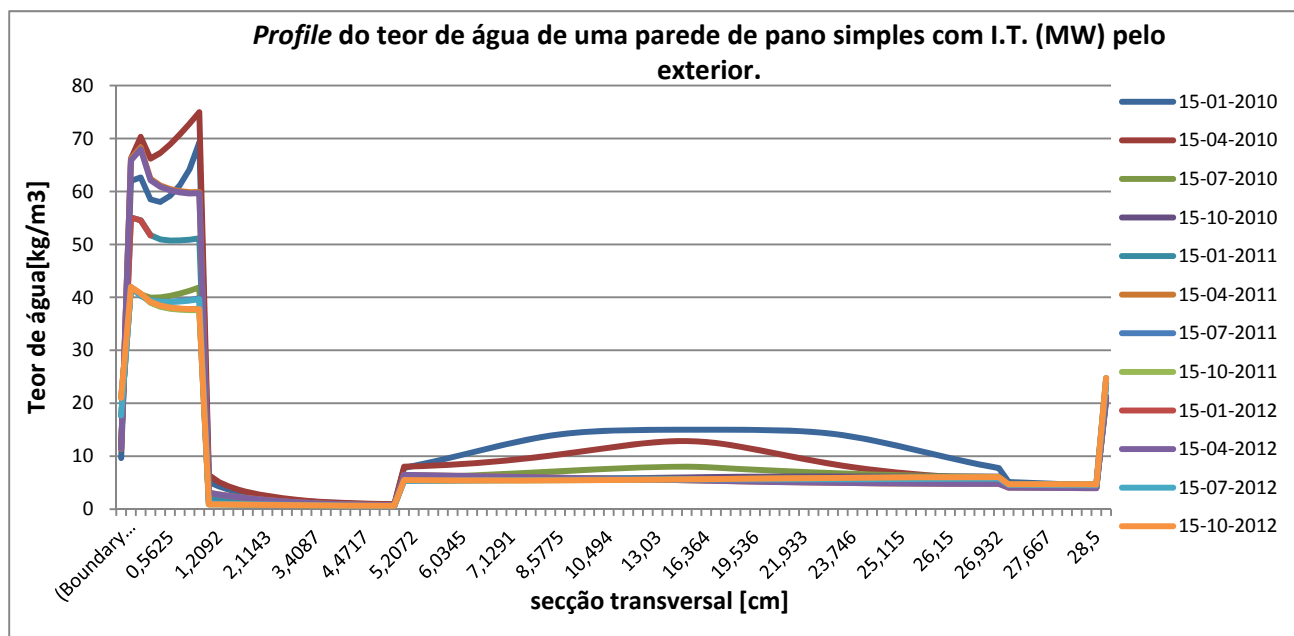


fig. 46 - *Profile do teor de água de uma parede de pano simples com isolamento térmico pelo exterior (lã mineral)*

Em relação às soluções que apresentam o mesmo isolante, mas com diferentes espessuras (4 e 6cm), as diferenças no valor do teor de água são bastante menores, apenas de 5,32% e 3,02%, para as soluções com lã mineral e EPS, respectivamente [vd. Tabela 13].

Conclui-se então que é primordial na avaliação da secagem duma parede com a colocação de isolante pelo exterior (com semelhante coeficiente de transmissão térmica –  $\lambda$ ) a análise de duas variáveis: espessura do isolante térmico e a resistência à difusão de vapor, devendo-se dar maior relevo a esta última, como se pode comprovar ao visualizar a Tabela 13 (existe maior diferença de teor de água para diferentes materiais com a mesma espessura, do que para diferentes espessuras do mesmo material).

Tabela 13 - Diferenças médias do teor de água entre isolantes com diferente material e/ou espessura

Teor de água em kg/m <sup>3</sup>	Soluções com lã mineral (diferença entre I.T. com espessura 4cm e 6cm)	Soluções com EPS (diferença entre I.T. com espessura 4cm e 6cm)	Soluções com espessura I.T.=4cm (diferença entre I.T. EPS e lã mineral)	Soluções com espessura I.T.=6cm (diferença entre I.T. EPS e lã mineral)
Diferenças médias do teor de água (1ano)	4,85%	0,82%	13,00%	16,62%
Diferenças médias do teor de água (3anos)	5,32%	3,02%	6,81%	8,87%

#### 7.3.2.2.2. *Solução com isolamento pelo interior*

A colocação de isolante térmico pelo interior, além de não funcionar como uma protecção à chuva, provoca uma redução do valor de temperatura na alvenaria (à excepção dos meses do Verão, onde o processo de secagem não se assume como um elemento essencial), reduzindo desta forma a capacidade de secagem da parede, por razões que serão explicadas posteriormente.

Ao visualizar o gráfico da temperatura na zona de alvenaria [vd.fig. 47], observa-se então que a colocação de isolante pelo interior faz baixar a temperatura na estação de aquecimento quando a temperatura interior é maior que a exterior, comparando com a situação de não colocação do isolante. De facto, para esta situação onde o fluxo de calor tem o sentido do interior para o exterior, a existência de um isolante térmico (que tem uma elevada resistência térmica) pelo interior da solução construtiva, provoca uma redução enorme da temperatura logo no interior. Isto dá origem a que a temperatura na alvenaria seja mais baixa comparativamente a uma solução sem isolante térmico, onde não há redução brusca da temperatura logo no interior. Deste modo, se a temperatura é mais baixa, como explicado no subcapítulo 7.3.1, a parede terá uma menor capacidade de secagem.

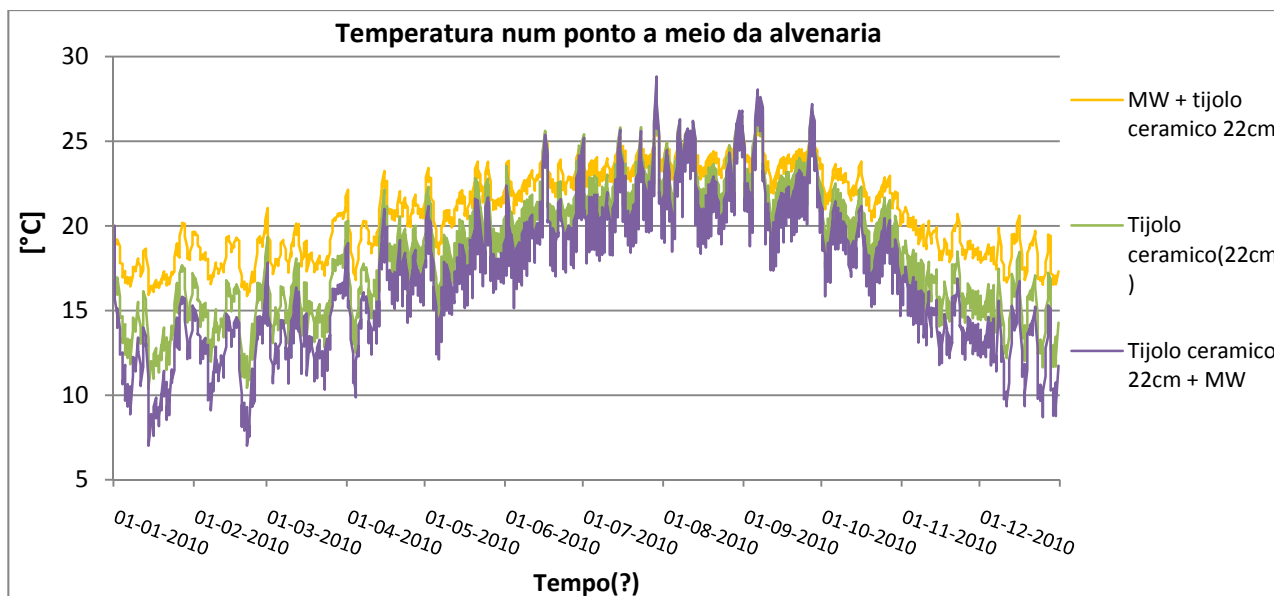


fig. 47 – Temperatura num ponto a meio da camada de alvenaria, para diferentes soluções construtivas

Observando agora em pormenor, o gráfico do teor de água na alvenaria ao longo do período de simulação [vd.fig. 48], constata-se o referido anteriormente, isto é, a colocação de isolante pelo interior faz com que a redução do teor de água (fase de secagem) seja menos acentuada, pois independentemente do material, existe um maior valor de teor de água médio na alvenaria. Contudo, regista-se uma ligeira diferença do teor de água na parede entre a colocação de EPS e lã mineral. O facto de a lã mineral ter um coeficiente de permeabilidade ao vapor de água superior, faz com que a redução do teor de água seja maior, devido a um maior valor do fluxo de vapor (o fluxo de vapor é proporcional ao coeficiente de permeabilidade ao vapor [vd.3.3.6]) que consegue atravessar o isolante.

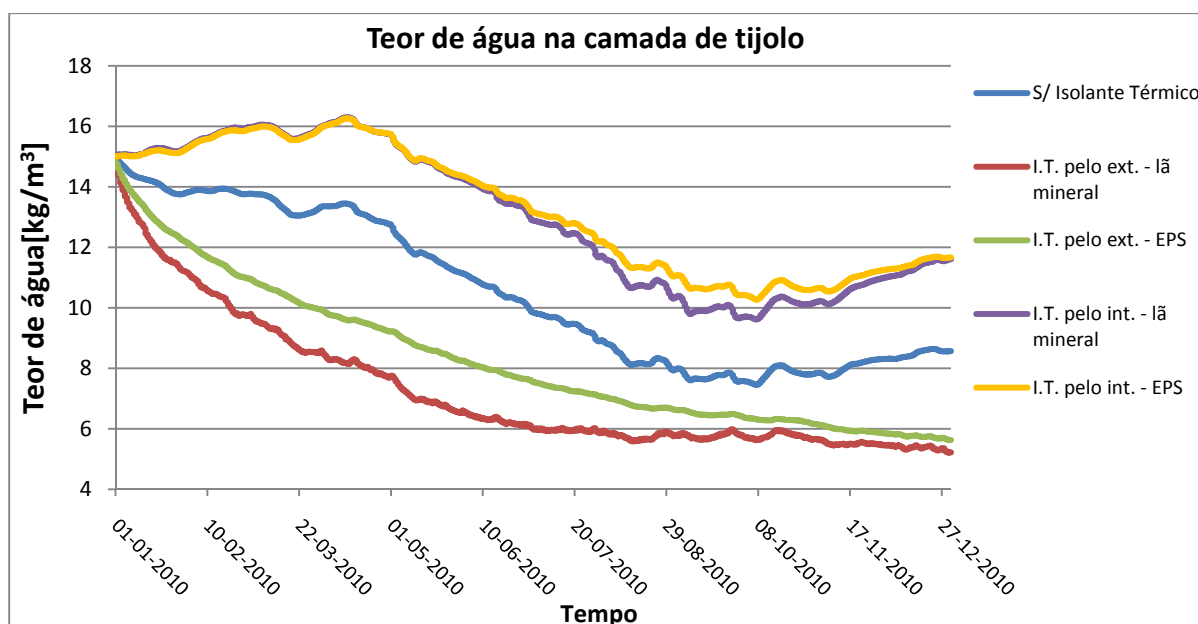


fig. 48 – Teor de água na camada de tijolo ao longo do período de simulação, para diferentes soluções construtivas.

### 7.3.3. Solução de reabilitação com a aplicação dum produto hidrófugo na envolvente exterior e colocação de isolante térmico pelo interior

#### 7.3.3.1. Introdução

Neste subcapítulo serão abordados em simultâneo dois aspectos já referidos anteriormente: colocação de hidrófugo na envolvente exterior e colocação de isolante térmico pelo interior. O caso simulado será a reabilitação de um edifício histórico de carácter habitacional, da década de quarenta, cinquenta. Nestes edifícios normalmente observa-se paredes de pano simples com tijolos maciços [48]. Para a sua envolvente externa irá considerar-se que não exibe uma protecção adequada à chuva incidente, esta situação, além de reduzir a resistência térmica da parede exterior, amplifica o risco de degradação devido a geadas<sup>36</sup> na camada mais próxima do paramento exterior [40].

O objectivo é encontrar soluções de reabilitação que confirmem à parede externa uma melhor qualidade térmica e uma melhor protecção contra a humidade vinda do exterior. Atendendo a que se trata de um edifício histórico, é necessário escolher soluções de reabilitação que não interfiram na aparência da fachada.

<sup>36</sup> Para ocorrerem danos devido a geadas, é preciso que a parede esteja suficientemente molhada e a água líquida que está dentro dos poros congele (a temperatura de congelação da água não necessita obrigatoriamente de ser aos 0°C [63]).

A colocação de isolante térmico pelo interior e aplicação de um hidrófugo na envolvente externa é uma solução que cumpre as exigências referidas no parágrafo anterior.

Neste capítulo irá examinar-se o desempenho da aplicação desta solução realizada de uma só vez, ou por fases (havendo alternância na ordem de colocação das camadas). Nesta simulação considerou-se que após aplicação do hidrófugo, existe uma protecção eficaz contra a chuva incidente. Assim sendo, ignora-se que esta solução é paliativa, pois no decorrer do tempo a sua eficácia no que diz respeito à protecção da fachada à chuva incidente vai diminuindo [29].

#### **7.3.3.2. Dados introduzidos para a realização da simulação higratérmica**

A solução construtiva será constituída por paredes simples de alvenaria com tijolo maciço, com uma espessura de quarenta centímetros, rebocada por argamassas de ligantes minerais em ambos os lados. O material escolhido é o *solid brick historical*, que em relação ao tijolo cerâmico vazado usado nas outras simulações, tem uma maior massa volúmica [vd.3.2.1], menor porosidade [vd.3.2.2] e um maior coeficiente de condutibilidade térmica [vd.3.2.4]. A classe de exposição escolhida é a orientação crítica para a zona de Lisboa, ou seja, a orientação Sudoeste.

As condições de fronteira da envolvente exterior são dados meteorológicos do ficheiro climático de Lisboa medidos de hora a hora [vd.5]. Para a envolvente interior, os dados são definidos com base na EN15026 [vd.4.4.2.4]. O *teor de humidade inicial* para as camadas existentes antes da reabilitação é o valor de *build-in moisture*. Como já foi referido [vd.4.2.4], para valores de teor de água acima deste valor, existe um risco considerável de ocorrência de degradação no material, daí a opção por este valor. A ideia foi considerar que os materiais se encontravam com o valor limite de teor de água, pretendo-se então estudar soluções em que resultem numa redução do teor de água. O objectivo é eliminar o risco de degradações, devido à presença excessiva de água nestas camadas. As camadas novas que surgem após reabilitação terão a humidade resultante do processo construtivo.

O efeito da água repelente devido à aplicação do hidrófugo é simulado por uma não-absorção de água na superfície da fachada (*coeficiente de absorção (A) do revestimento exterior* passe a valer zero) e uma resistência à difusão adicional de superfície ( $\mu$ ) de 0,2 m, medida em testes de campo [40]. Todos estes valores mais relevantes e outros dados de entrada para esta simulação estão presentes no Anexo B - Tabela 8.

### 7.3.3.3. Resultados e análise da evolução do teor de água no pano de alvenaria

Os resultados obtidos são a evolução do teor de água para uma solução construtiva, mas com ordens cronológicas de aplicação diferentes [vd.Tabela 14].

Tabela 14 – Diferentes ordens cronológicas na aplicação da solução de reabilitação

Soluções:	1ª ao 3ª ano	3ª ao 4ªano
1	Apenas Isolamento térmico interior	Isolamento térmico interior + hidrófugo na envolvente externa
2	Isolamento térmico interior + hidrófugo na envolvente externa	Isolamento térmico interior + hidrófugo na envolvente externa
3	Apenas hidrófugo na envolvente externa	Isolamento térmico interior + hidrófugo na envolvente externa

Ao observar a evolução do teor de água para os três casos considerados [vd.fig. 49], verifica-se que apesar de ser a mesma solução de reabilitação, o facto de haver diferentes ordens cronológicas na aplicação das camadas, origina resultados muito díspares. Porém, existe um dado em comum nestes três casos, que é a secagem da parede a longo prazo (ao fim de quatro anos, o valor teor de água é residual para os três casos). Já o tempo de secagem é bastante diferente. No que refere a este facto, pode-se concluir que a melhor solução é aquela em que se aplica inicialmente apenas o hidrófugo de superfície e a pior é a solução em que se aplica primeiramente apenas o isolante térmico pelo interior. Nesta solução, a colocação do isolante térmico e a inexistência de uma protecção na envolvente à chuva incidente, faz diminuir as condições de secagem da parede [vd.7.3.1], obtendo-se valores mais elevados de teor de água ao longo do período de simulação.

Ao assumir-se que a aplicação do hidrófugo na envolvente externa garante uma protecção eficaz à chuva incidente, independentemente de haver ou não ocorrência de precipitação, o teor de água da solução construtiva não é alterado (pelo menos de uma forma significativa), o que origina que estas soluções sejam indiferentes às variações de precipitação que existem ao longo das estações do ano [vd.5.5], como se pode ver pela evolução das curvas (vermelha e verde da fig. 49), referentes às soluções em que se aplica hidrófugo logo no primeiro ano. Por sua vez, o caso em que se aplica inicialmente apenas o isolante térmico, já é sensível a estas variações (curva azul da fig. 49).

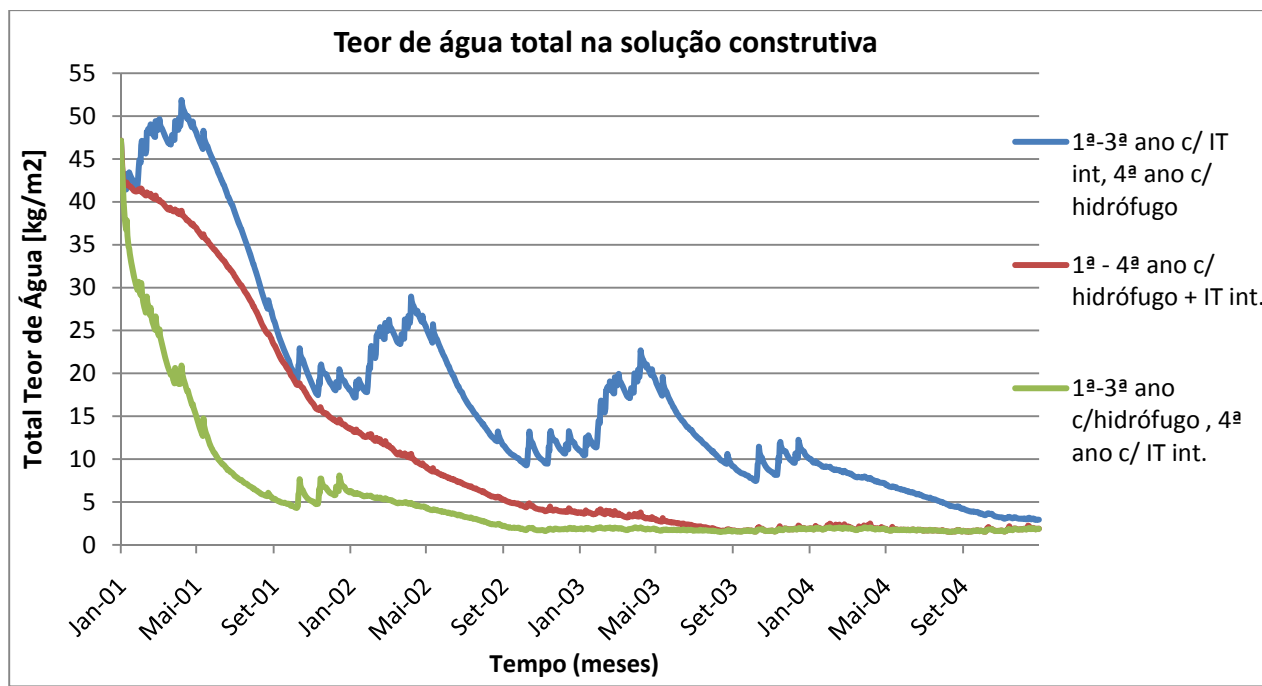


fig. 49 – Teor de água total em toda a solução construtiva ao longo do período de simulação, para soluções com materiais iguais, mas colocados em espaços temporais diferentes

Após a análise a estes resultados, existem dois pontos a destacar:

- No caso de reabilitações de edifícios antigos com interesse histórico em que se deva manter a aparência da sua fachada por razões estéticas ou históricas, a medida mais acertada para melhorar o seu comportamento higrotérmico é a aplicação de um produto com agentes repelentes à água (por exemplo um hidrófugo), possivelmente combinado com um isolamento interior, caso a solução construtiva não tenha a resistência térmica necessária.

- Para a solução construtiva analisada neste subcapítulo, um produto hidrófugo deve ser aplicado na fachada antes da colocação do isolamento interior (para que ocorra a secagem da humidade mais excessiva). Caso contrário, haverá um aumento do risco de degradações com as geadas, devido à influência do isolante térmico na capacidade de secagem da alvenaria, juntamente com o aumento do gradiente de temperatura que a alvenaria passará a estar sujeita [40].



## **8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

### **8.1. Principais conclusões**

Terminado o estudo do comportamento higrotérmico de diversas paredes (diferentes soluções construtivas) que se usaram neste trabalho, importa referir as conclusões e observações finais que dele se obtiveram. De uma forma sucinta, estudou-se o comportamento higrotérmico de paredes exteriores através do uso de modelos higrotérmicos. Assim, foi possível obter exigências ao nível da escolha do tipo de materiais e respectivo posicionamento, relativamente às quais, o desempenho dos edifícios será afectado se não forem cumpridas.

Outro tema muito abordado ao longo das várias simulações higrotérmicas, foi o controlo de humidade na construção, dado que actualmente existem muitos edifícios com elevada degradação em resultado directo ou indirecto da presença de humidade em excesso e uma vez que um controlo de humidade apropriado é um pré-requisito para a eficiência energética. A partir dos estudos realizados foi possível obter diversas conclusões que serão apresentadas seguidamente, em cada tópico.

- Avaliação do risco de condensações internas no pano de alvenaria

- Para efeitos de dimensionamento (projecto higrotérmico) deve-se optar por modelos de simulação numérica que usem o regime variável (como segue o WUFI) em detrimento de um modelo que siga o regime estacionário (como é o caso do método de Glaser), porque na análise do risco de condensações internas, os valores horários de um determinado período resultam em condições mais propícias à ocorrência de condensações do que os valores médios nesse mesmo período.

- A colocação de isolante térmico pelo interior provoca uma diminuição da temperatura no pano de alvenaria, resultando em maiores valores de humidade relativa e consequentemente aumenta o risco de ocorrência de condensações internas.

- Na solução de isolamento térmico pelo exterior registaram-se menores flutuações no valor de humidade relativa, pois o pano de alvenaria está sujeito a um menor gradiente de temperaturas.

- No caso de reabilitação térmica de um edifício que tenha paredes com elevada presença de sais higroscópicos, deve-se optar por colocar isolante térmico pelo exterior, para

evitar ao máximo grandes flutuações da humidade relativa, que originem as sequências destrutivas dissolução/cristalização.

- A introdução de uma barreira pára-vapor numa parede diminui a densidade do fluxo de vapor de água, originando maiores valores de pressão parcial de vapor de água ao longo da secção transversal da parede exterior e consequentemente um acréscimo de humidade relativa. Desta forma, a colocação de uma barreira pára-vapor na superfície exterior ou entre as camadas de uma parede é completamente desaconselhável. Já a colocação de uma barreira pára-vapor pelo interior, tem como consequência uma menor quantidade de vapor de água a atravessar a parede, resultando numa diminuição da humidade relativa.

- As condições do ambiente interno têm influência no aparecimento de condensações internas. Uma diminuição da temperatura ambiente provoca uma redução da temperatura ao longo de toda a secção transversal da parede, que tem como efeito o aumento da humidade relativa, sendo o resultado semelhante num caso de aumento da humidade absoluta interna.

- A avaliação do risco de condensações superficiais, proliferação de fungos e fenómeno de termoforese no paramento interior da parede exterior

- Em paramentos de paredes que apresentem valores de humidade relativa menores que 80%, independentemente da sua temperatura, não há risco de proliferação de fungos em materiais com estrutura porosa.

- Quanto maior a temperatura (até aos 28°C, temperatura ideal para a proliferação de fungos), menor poderá ser a humidade relativa na superfície para se estar numa situação em que haja risco de proliferação de fungos.

- As soluções construtivas com valores de coeficiente de transmissão térmica que cumpram os limites de referência impostos pelo RCCTE para uma parede exterior (por exemplo parede dupla com isolante térmico de quatro centímetros), não apresentam risco de proliferação de fungos no paramento interno.

- Em soluções que apresentem zonas com diferentes resistências térmicas, existirão diferentes temperaturas superficiais ao nível do paramento interior. Os resultados confirmam que quanto maior a resistência térmica da solução construtiva, maior será a temperatura superficial interior da parede. Assim, numa parede de alvenaria cerâmica, na zona do tijolo registam-se maiores temperaturas do que nas juntas de argamassa. Uma das formas de atenuar estas diferenças de temperatura é diminuir a espessura da junta de argamassa. Deste modo,

pode-se afirmar que a presença do fenómeno de termoforese tem uma gravidade que é função da espessura da junta de argamassa.

- Para materiais porosos, se os materiais que compõem o paramento interior estiverem a diferentes temperaturas terão diferentes valores de humidade relativa, originando um comportamento higroscópico diferencial, que pode motivar a ocorrência de fenómenos de proliferação de fungos só em determinadas zonas.

- A colocação de isolante térmico pelo interior (a revestir a zona estrutural e zona corrente) faz com que o paramento interior da parede exterior fique com um comportamento mais homogéneo, eliminando o risco de fenómeno de termoforese e o risco diferencial de proliferação de fungos entre a zona estrutural e a zona corrente.

- Comportamento do paramento exterior da parede exterior, face às cargas higrotérmicas

- Para acção da temperatura, conclui-se:

- Numa solução de parede *sandwich* sem correcção na zona de ponte térmica, o resultado das temperaturas superficiais no paramento exterior apresenta uma diferença significativa (em certos casos superior a 10°C) entre a zona estrutural e a zona corrente, estando desta forma reunidas as condições para que ocorra o fenómeno de termoforese.

- Numa parede exterior, a correcção da ponte térmica com forra cerâmica, ou a aplicação de isolante térmico pelo exterior em toda a envolvente, tem um contributo significativo para evitar o aparecimento do fenómeno de termoforese, pois provoca a eliminação das heterogeneidades ao nível das temperaturas superficiais.

- No estudo das temperaturas superficiais em ladrilhos cerâmicos, a maior amplitude térmica foi registada para o caso em que tinham uma cor preta e estavam orientados para Sul. O valor máximo da amplitude foi de 53,6°C, assim, se não houver restrição à livre deformação dos ladrilhos, obtém-se uma variabilidade dimensional de  $\Delta L=0,48\text{mm/m}$ .

- Para acção da humidade, conclui-se:

- Nas orientações Norte e Poente registam-se os maiores valores de teor de humidade à superfície e por períodos de tempo mais prolongados. Na orientação Norte tal é devido à ocorrência de condensações superficiais, enquanto na fachada Oeste a humidificação ocorre

sobretudo devido ao efeito da chuva incidente. Assim, o desenvolvimento de microrganismos ocorre com maior gravidade nas fachadas Norte e Oeste.

- Nível do risco de ocorrência de condensações superficiais no paramento exterior da parede exterior

- Num reboco externo onde seja anulado o transporte capilar de água, irá acumular-se muita humidade junto à superfície, uma vez que nestas condições a humidade só poderá atravessar o reboco por difusão. Este aumento de humidade levará a que existam mais períodos com humidade relativa igual a 100% na superfície.

- O uso de materiais no revestimento da envolvente exterior com uma maior resistência à difusão ( $\mu$ ) resulta num aumento da pressão parcial de vapor de água junto à superfície, que provoca um acréscimo de humidade relativa, levando a um maior período em que ocorrem condensações superficiais.

- O uso de materiais no revestimento da envolvente exterior com menor emissividade ( $\varepsilon$ ) e com um maior coeficiente de absorção de radiação por onda curta ( $\alpha_s$ ) originam um acréscimo do valor do balanço radiativo total na superfície exterior (I), provocando desta forma um aumento da temperatura desta. Assim sendo, reduz-se o risco de ocorrência de condensações superficiais.

- Quanto maior a espessura do isolante térmico, maior a resistência térmica da solução construtiva da parede e consequentemente menor é o fluxo de calor que vem do interior e chega à superfície exterior, resultando numa menor temperatura desta.

- Em situações de *overcooling*, ao anular-se o vento tem como resultado um aumento da ocorrência de condensações superficiais. A razão é que a anulação do vento, elimina as trocas convectivas entre a superfície exterior e o ambiente exterior, que contribuem para o aumento da temperatura da superfície exterior, quando esta apresenta uma temperatura inferior à do meio ambiente.

- Ao contrário do vento, a anulação da chuva não surte uma alteração significativa no número de horas em que existem condensações superficiais. A justificação é devido a uma limitação que o WUFI tem, que é não considerar o aumento da entalpia resultante do aumento da água líquida na parede (proveniente da ocorrência de chuva).

- O aumento do índice de nebulosidade (N) provoca um menor número de horas de ocorrência de condensações. Isto explica a razão porque em noites de céu limpo (menor valor

de N) existem maiores riscos para que ocorram condensações na superfície exterior da parede exterior.

- Quanto maior for a temperatura do ambiente interior, maior será o gradiente térmico que a parede estará sujeita e consequentemente maior será o fluxo de calor que a atravessa, logo a superfície exterior terá maior temperatura, conduzindo a que existam menores condensações nessa zona.

- Protecção da parede exterior à chuva incidente conferida pelo revestimento exterior

- Os limites estabelecidos pelo Fraunhofer-Institute para o coeficiente de absorção (A) e espessura da camada de ar de difusão equivalente (Sd) do revestimento externo para que este confira uma boa protecção à chuva incidente, adequam-se na íntegra ao clima de Lisboa.

- Em relação à presença de teor de água na alvenaria, o coeficiente de absorção tem maior influência do que o valor de Sd, uma vez que para soluções que têm o mesmo valor de  $C_{RP}$ , as que apresentam revestimentos externos com maior coeficiente de absorção, têm maior teor de água no pano de alvenaria.

- A consideração de existência de um aumento do valor do coeficiente de absorção do revestimento exterior ao longo do período de cálculo (para considerar o seu envelhecimento) deve ser tida em conta, uma vez que os resultados mostram de uma forma evidente, que existe uma diferença significativa no valor do teor de água na alvenaria entre a consideração ou não do aumento anual do valor do coeficiente de absorção.

- Tendo em vista a secagem da parede, a solução de reboco hidrófugado é a melhor opção, uma vez que existe uma redução substancial do teor de água ao longo do período de simulação, devido à absorção de água do revestimento exterior ser nula.

- Numa situação de reabilitação, a aplicação de um hidrófugo de superfície dá origem a uma redução significativa do teor de água, partindo do pressuposto que a aplicação do hidrófugo é perfeita, resultando num total impedimento à passagem da água, e que a única fonte de humidade na parede é apenas proveniente da acção da chuva.

- Em paredes com presença de sais à superfície, após aplicação do produto hidrófugo, há o risco de ocorrência de fenómenos de criptoflorescências, em vez de eflorescências. A dimensão desta situação é maior, quanto mais elevada for a resistência à difusão de vapor (Sd) por parte do revestimento externo hidrófugado.

- Efeito da colocação de isolamento térmico e aplicação de hidrófugo na envolvente exterior, no comportamento higrotérmico de paredes exposta à chuva incidente

- Colocação de isolante térmico pelo exterior

- Os resultados revelam que as soluções com lã mineral têm uma secagem mais rápida, comparativamente às soluções com EPS, uma vez que a lã apresenta uma menor resistência à difusão de vapor. Assim, no caso da lã mineral, a difusão de vapor dá-se nos dois sentidos: exterior e o interior. Já no caso da colocação do EPS, a maioria da difusão de vapor dá-se apenas em direcção ao interior.

- É primordial na avaliação da secagem numa parede com a colocação de isolante pelo exterior (com semelhante coeficiente de transmissão térmica), a análise de duas variáveis: espessura do isolante térmico e a resistência à difusão de vapor. Pelos resultados obtidos deve-se dar maior relevo a esta última.

- Colocação de isolante térmico pelo interior

- A colocação de isolante térmico pelo interior dá origem a que a temperatura na alvenaria seja mais baixa (comparativamente à situação de não colocação de isolante). Deste modo, a parede terá uma menor capacidade de secagem.

- Situação de reabilitação de um edifício habitacional antigo: colocação de isolante térmico pelo interior e hidrófugo de superfície no paramento exterior

- Ao analisar estas soluções, conclui-se que o facto de haver diferentes ordens cronológicas na aplicação das mesmas camadas origina resultados muito díspares ao nível do teor de água no pano de alvenaria. Em todos os casos obtém-se a secagem da parede a longo prazo (ao fim de quatro anos), mas o tempo de secagem é bastante diferente. Para este aspecto, a melhor solução é aquela em que se aplica inicialmente apenas o hidrófugo de superfície e a pior é a solução em que se aplica primeiramente apenas o isolante térmico pelo interior.

- Ao assumir-se que a aplicação do hidrófugo na envolvente exterior garante uma protecção eficaz à chuva incidente, independentemente se há ou não ocorrência de precipitação, o teor de água na parede não é alterado, o que origina que estas soluções sejam indiferentes às variações do valor de precipitação que existe ao longo das estações do ano.

- No caso de reabilitações de edifícios habitacionais antigos, em que se deva manter a aparência da sua fachada por razões estéticas ou históricas, a medida mais acertada para melhorar o comportamento higrotérmico do edifício é a aplicação de um produto com agentes repelentes à água (por exemplo um hidrófugo), possivelmente combinado com um isolamento interior, caso a solução construtiva não tenha a resistência térmica necessária.

## 8.2. Desenvolvimentos futuros

Os resultados obtidos nesta dissertação permitem estabelecer diferentes vias para a continuidade do trabalho desenvolvido:

- Ao nível do estudo unidimensional:

- Através de ensaios de campo, determinar valores de coeficientes que tenham em conta o sombreamento de uma superfície (que resulta numa menor quantidade de radiação solar directa), à semelhança dos coeficientes que existem para o cálculo da *quantidade de chuva incidente* numa fachada.

- Estudar o envelhecimento dos materiais, que provoca uma variação nas suas propriedades. À semelhança do que se fez nesta dissertação para o coeficiente de absorção, analisar qual o efeito na alteração de outras propriedades nos resultados das simulações higrotérmicas.

- Estudar o comportamento higrotérmico de materiais que não foram utilizados nesta dissertação, por exemplo a madeira.

- A base de dados do WUFI utiliza determinados materiais que diferem dos correntemente utilizados em Portugal. Através de ensaios de laboratório determinar os valores das propriedades (solicitadas pelo WUFI para a realização da simulação) para os materiais utilizados em Portugal.

- Ao nível do estudo bidimensional:

- Estudar o fenómeno de convecção que existe nas caixas-de-ar de paredes exteriores, devido à variação de temperatura ao longo do paramento vertical, que origina correntes de convecção.

- Estudar soluções de piso radiante através da opção: *fontes de calor*. Estudar qual a solução construtiva para o pavimento, que torna este sistema de aquecimento mais eficiente.
- Estudar o fenómeno de ascensão capilar. Analisar diferentes sistemas que existem no mercado, com objectivo de reduzir os danos provocados por esta fonte de humidade.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] ASHRAE - American Society for Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers Handbook of Fundamentals. Atlanta, ASHRAE, Chapter 23, 2009.
- [2] ASHRAE Standard 160P - Design Criteria for Moisture Control in Buildings. Atlanta, ASHRAE, July 2006.
- [3] Barreira, E. – Condensações Superficiais Exteriores, em WUFI 2010 – Workshop sobre Simulação Higrótérmica. Porto, FEUP, Março 2010.
- [4] Camacho, João – Simulação de Ambientes - O estudo das variáveis construtivas ao nível das energias passivas e activas pode ser muito estimulante. Revista Engenharia e Vida, Edição 07, pág. 79, 2008.
- [5] Castro, J. – O “CAPPOTTO” como um Agente da Eficiência Energética, em Tektónica 2010 – Seminário Contribuição das Argamassas e dos ETICS para a Eficiência Energética dos Edifícios. Lisboa, Associação Tintas Robbialac, Maio 2010.
- [6] Catálogo Reboco ultra hidrófugo da Lafarge. Disponível em <http://www.lafarge.com/>. Acesso em Abril de 2010.
- [7] Delgado, J. – Influência das condições climáticas exteriores, em WUFI 2010 – Workshop sobre Simulação Higrótérmica. Porto, FEUP, Março 2010.
- [8] Dias, B. – Manual de Alvenaria de Tijolo. Coimbra, APICER, 2009.
- [9] DIN 4108-3, Thermal protection and energy economy in buildings, Part 3: Protection against moisture subject to climate conditions—Requirements and directions for design and construction. July 2001
- [10] EN 12524:2000 – Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values. Brussels, CEN, July 2000.
- [11] EN15206 -Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation. Brussels, CEN, April 2007.
- [12] ENISO13788 - Hygrothermal performance of building component and building elements - Internal Surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods. Brussels, CEN, July 2001.
- [13] Estação meteorológica da FEUP. Disponível em <http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica>. Acesso em Março de 2010.

- [14] Ferreira, R. – RCCTE- Influência das Envolventes, em Tektónica 2010 – Seminário Contribuição das Argamassas e dos ETICS para a Eficiência Energética dos Edifícios. Lisboa, ISEC, Maio 2010.
- [15] Freitas, V.P. *et al* – Análise de Condensações Internas em Paredes – Aplicação de Modelos de diferentes complexidades. Porto, PATORREB 2009, 2009.
- [16] Freitas, V.P; Barreira, E. - Condensações superficiais nos Etics – Avaliação Experimental. Porto, PATORREB 2009, 2009.
- [17] Freitas, V.P; Sousa, M. - Ficha B09 PATORREB, Parede Exterior – Deficiente Concepção e Aplicação do Revestimento. PATORREB, APFAC, FEUP.
- [18] Freitas, V.P; Sousa, M. - Ficha 010 PATORREB, Parede Exterior – Condensações Superficiais. PATORREB, FEUP.
- [19] Freitas, V.P; Alves, M.S. - Ficha B11B PATORREB, Parede Exterior - Termoforese. PATORREB, FEUP, APFAC.
- [20] Freitas, V.P; Sousa, M. - Ficha 012 PATORREB, Parede Exterior – Condensações Superficiais. PATORREB, FEUP.
- [21] Freitas, V.P. – Importância da Simulação Numérica nos estudos Higrotérmicos, em WUFI 2010 – Workshop sobre Simulação Higrotérmica. Porto, FEUP, Março 2010.
- [22] Freitas, V.P. - Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior, Reboco Delgado Armado sobre Poliestireno Expandido – ETICS, pag57. Porto, FEUP, Dezembro de 2002.
- [23] Freitas, V.P. *et al* – Propriedades Higrotérmicas Utilizadas em simulação Numérica. Porto, PATORREB2009, 2009.
- [24] Freitas, V. P. - Transferência de humidade em paredes de edifícios. Porto, Dissertação Universidade do Porto, 1992.
- [25] Gertis K.- Increased insulation in buildings - a way to avoid the coming change in climate? Bauphysik, 1991.
- [26] Gonçalves, P. - Patologia em rebocos. Secil Martingança, Novembro 2008.
- [27] Gonçalves,T.D. - Cristalização de sais solúveis em materiais porosos, em Seminário Materiais em Ambiente Húmido. Lisboa, LNEC, 2007.
- [28] Henriques, Fernando M.A.- Heterogeneidades em Elementos da Envolvente Exterior de Edifícios. Lisboa, UNL-FCT.
- [29] Henriques, Fernando M.A.- Humidade em Paredes. Lisboa, LNEC, 1994.
- [30] Henriques, Fernando M.A. - Comportamento Higrotérmico de Edifícios. Lisboa, UNL-FCT, 2007.

[31] Henriques, Fernando M.A.; Aelenei, D. – Reforço de Isolamento Térmico pelo interior – Avaliação Energética e Riscos Potenciais. Lisboa, UNL-FCT.

[32] Henriques, Fernando M.A. – The effects of differential thermal insulation of walls. Lisboa, UNL-FCT, September 2002.

[33] Holm, A. – Optimizing energy efficiency and damage prevention by hygrothermal simulation, in WUFI 2010 – Workshop sobre Simulação Higrotérmica. Porto, FEUP, Março 2010.

[34] Holm, A. *et al* - Concrete from the viewpoint of moisture technology: Parameters and mathematical approaches to the evaluation of climatic effects in external structural elements made of concrete. To be published in Concrete Science and Engineering.

[35] Holm, A. *et al* - Exterior surface temperature and humidity of walls – Comparison of experiment and numerical simulation. Florida, Buildings IX, 2004.

[36] Hunter, C. – Mould, IEA Annex XIV “Condensation and Energy”. IEA, 1991

[37] Krus, M. - Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods. Fraunhofer IRB Verlag, 1996.

[38] *Künzel*, H. - Effect of interior and exterior insulation on the hygrothermal behaviour of exposed walls. Germany,

[39] *Künzel*, H.; Sedlbauer, K. - Biological growth on stucco, Buildings III: Integration of Building Envelopes, 2001. Fraunhofer-Institute of Building Physics, 1998.

[40] *Künzel*, H.; Kießl, K. - Drying of bricks after impregnation. Germany, Fraunhofer-Institute of Building Physics, 1996.

[41] *Künzel*, H. *et al*- Exterior Surface Temperature of Different wall Construction, Comparison of Numerical Simulation and Experiment. Fraunhofer-Institute of Building Physics, 2002.

[42] *Künzel*, H. – Fundamentals and International standards for moisture control design by hygrothermal simulation, in WUFI 2010 – Workshop sobre Simulação Higrotérmica. Porto, FEUP, Março 2010.

[43] *Künzel*, H.M.; Kießl, K. - Hydrophobing historical facade for rain protection and thermal quality purposes. Proceedings of the International Symposium on Moisture Problems in Building Walls. Porto, 11-13. Sept., pp 1-14 (1995).

[44] *Künzel*, H; Holm, A. - Moisture Control and problem analysis of heritage constructions, pp. 85 - 102. Porto, PATORREB2009, 2009.

[45] *Künzel*, H. *et al* - Rain Protection of Stucco facades. ASHRAE, 2004

- [46] *Künzel, H.* - Simultaneous heat and moisture transport in building components. Verlag Stuttgart : Fraunhofer Institute of Buildings Physics, 1995.
- [47] Mendes N. - PC Program For The Prediction Of Heat And Moisture Transfer In Porous Building Materials. Proceedings of Building Simulation: Volume 1: pp. 277-283, 1999.
- [48] Pereira, M.F.P.- Anomalias em Paredes de Alvenaria sem função Estrutural. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Guimarães, Universidade do Minho, 2005.
- [49] Ramos, N.M. – “ A Importância da Inércia Higroscópica no Comportamento Higrotérmico dos Edifícios”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Porto, FEUP, Junho 2007.
- [50] Ramos, N.M. - Influencia das propriedades dos materiais, em WUFI 2010 – Workshop sobre Simulação Higrotérmica. Porto, FEUP, Março 2010.
- [51] RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei Nº 80/2006. Lisboa, PORTO EDITORA, 2006.
- [52] Rodrigues, M. – Higrotérmica – A importância das superfícies. Porto, PATORREB 2009, 2009.
- [53] Santos, C.P. Matias, L. – Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolventes dos Edifícios – ITE50. Lisboa, LNEC, 2007.
- [54] Sedlbauer, K. – Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components, PhD Thesis – report, Fraunhofer Institute for building Physics. Germany, Fraunhofer-Institute, 2001.
- [55] Silvestre; J.D. Brito, J. - Ficha 077 PATORREB, Parede Exterior – Acumulação de Humidade no Revestimento. PATORREB, IST.
- [56] Simões, N. – Processo de Revisão do RCCTE, em Tektónica 2010 – Seminário Eficiência Energética em Edifícios. Lisboa, ITeCons, Maio 2010.
- [57] Sousa, A.V.S. *et al* – Manual de Aplicação de revestimentos cerâmicos. Coimbra, APICER, 2003.
- [58] Universidade Nova de Lisboa (UNL) / Departamento de Engenharia Civil (DEC) – Fichas de Ensaio - Pedras Naturais e Artificiais. Determinação da massa volúmica. Caparica: FCT/UNL, 1996, Fe 01.
- [59] Universidade Nova de Lisboa (UNL) / Departamento de Engenharia Civil (DEC) – Fichas de Ensaio - Pedras Naturais e Artificiais. Determinação da porosidade aberta. Caparica: FCT/UNL, 1996, Fe 02.
- [60] Veiga, M.R. – Revestimentos de Isolamento Térmico de Fachadas com base em Argamassa: Comportamento e Avaliação da Qualidade, em Tektónica 2010 – Seminário

Contribuição das Argamassas e dos ETICS para a Eficiência Energética dos Edifícios. Lisboa, LNEC, Maio 2010.

[61] Wikipedia – Tensão Superficial. Disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Tens%C3%A3o\\_superficial](http://pt.wikipedia.org/wiki/Tens%C3%A3o_superficial). Acesso em Fevereiro de 2010.

[62] WUFI Documentos de apoio do programa WUFI. Fraunhofer Institute of Buildings Physics, 2005.

[63] WUFI Forum. Disponível em <http://www.WUFI-forum.com/WUFIForum/index.php>. Acesso em 2010.

[64] WUFI Site. Disponível em <http://www.WUFI-pro.com>. Acesso em 2010.



## **ANEXOS**





## **Anexo A**

### **Valores de propriedades de materiais utilizados pelo WUFI**



Anexo A - Tabela 1 - Valores do factor b [%/M, -%]

Material	Massa Volúmica [kg/m³]	$\lambda$ [W/mK]	b [%/M, -%]
Betão Celular	400-800	0,09-0,19	4
Tijolo sílica - cal	1800	0,7	8
Betão de argila expandida	1400-1800	0,5-1,0	4
Betão leve com agregados de EPS	300-900	0,07-0,28	3
Betão normal	2300	1,3-1,5	8
Madeira	400-700	0,08-0,15	1,5

Anexo A - Tabela 2 - Valores do factor de resistência à difusão de vapor de água ( $\mu$ ) para alguns materiais usados no WUFI

Valor de $\mu$		
	Dry-cup (3% - 50% HR)	Wet-cup (50%-93% HR)
Betão Celular autoclavado	7.7	7.1
Tijolo de sílica e cal	27	18
Tijolo maciço	9.5	8.0
Placa de Gesso	8.3	7.3
Betão (B25)(*)	110	150 (*)
Reboco de cimento	19	18
Rebolo de cal	7.3	6.4
(*) O aumento do valor de $\mu$ na medição de amostra húmida de betão é provavelmente devido a efeitos de aumento de volume [34]		

Anexo A - Tabela 3 - Valores do coeficiente R1

	Valor de R1
Superfície vertical ( $i=90^\circ$ )	0
Superfície inclinada ( $i$ entre 1 e $89^\circ$ )	1
Superfície horizontal ( $i=0^\circ$ )	1

Anexo A - Tabela 4 - Valores do coeficiente R2

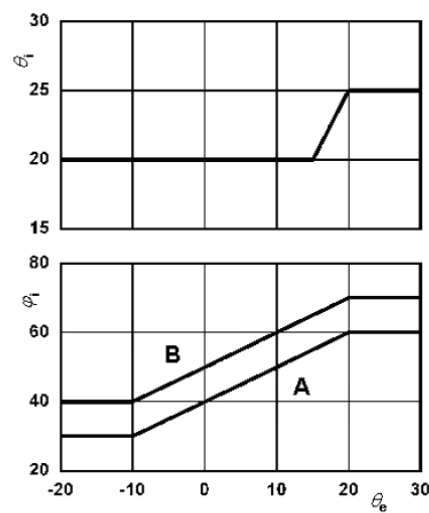
	Valor de R2 (s/m)
Se a superfície tiver uma inclinação diferente de 90°.	0
Edifício de elevada altura – a superfície encontra-se no fundo da fachada do edifício, a menos de 10 metros de altura. A influência de edifícios e vegetação vizinha é muito alta.	0,05
Edifício de reduzida altura – a superfície encontra-se a menos de 10 metros de altura. A influência de edifícios e vegetação vizinha é alta.	0,07
Edifício de elevada altura – a superfície encontra-se no meio da fachada do edifício, entre 10 e 20 metros de altura. A influência de edifícios e vegetação vizinha é baixa.	0,1
Edifício de elevada altura – a superfície encontra-se no topo da fachada do edifício, a mais de 20 metros de altura. Não existe influência de edifícios e vegetação vizinha.	0,2

Anexo A - Tabela 5 - Coeficiente de absorção de radiação por onda curta ( $\alpha_s$ ) [62]

Materiais	$\alpha_s$
Gesso, branco	0,4
Telha vermelha	0,6
Tijolo à vista (vermelho escuro)	0,7
Telha, marrom	0,8
Telha do betuminoso	0,9
Madeira tratada	0,4
Pintado marrom	0,8
Arenito vermelho Geral	0,75
Arenito	0,9

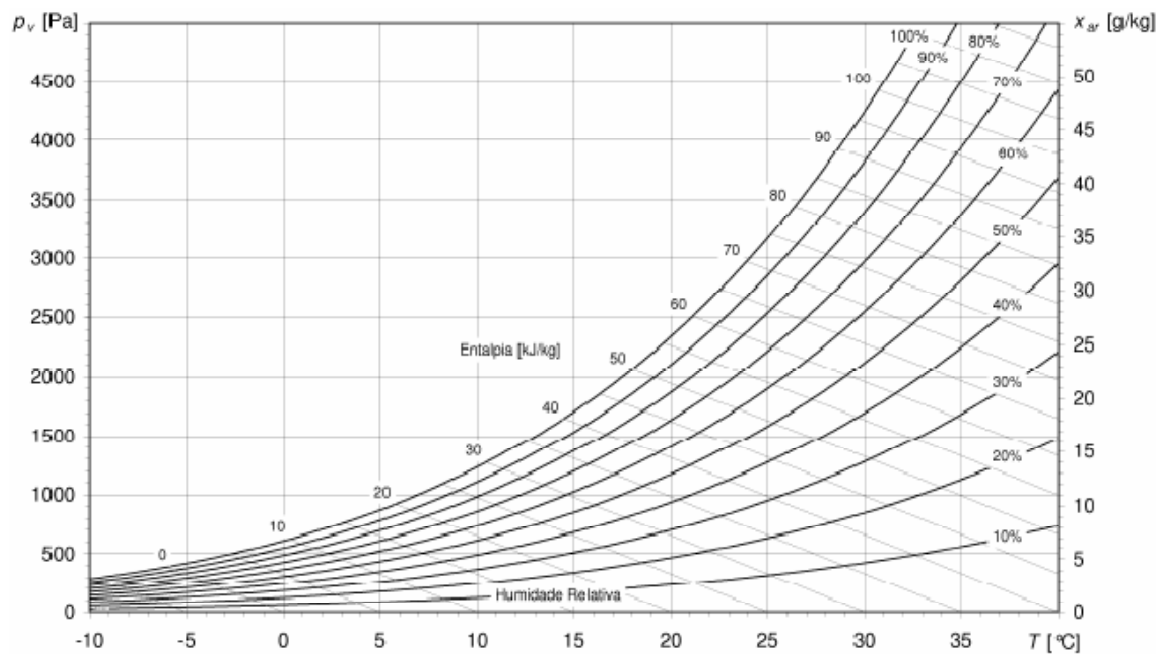
Anexo A - Tabela 6 - Valores de Teor de água inicial do material em kg/m<sup>3</sup> [64]

Material	Teor de água inicial do material [kg /m <sup>3</sup> ]
Betão Fresco (sem ter ganho presa)	175
Betão celular	180 a 220
Alvenaria de tijolo de barro	100 a 150
Alvenaria de tijolo de sílica	100 a 120

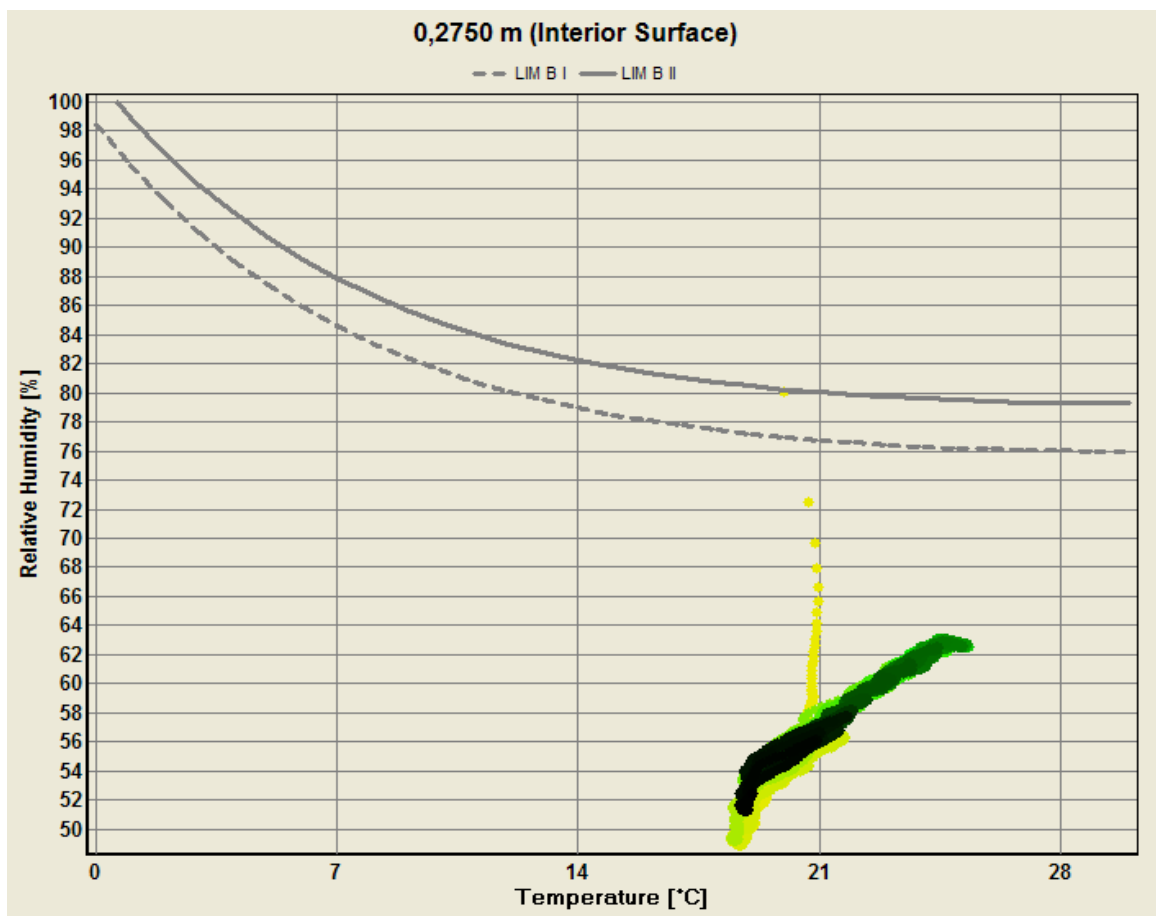


Key	$\phi_i$ internal relative humidity %
$\theta_i$ internal temperature °C	A : Normal occupancy
$\theta_e$ external temperature °C	B : High occupancy

Anexo A - fig. 1 - Média diária da temperatura e humidade interna em edifícios de habitação e escritórios dependendo da média diária da temperatura exterior [11]



Anexo A - fig. 2 – Exemplo de diagrama psicométrico



Anexo A - fig. 3 – Gráfico de avaliação de risco de proliferação de fungos (Curva LIM B I a tracejado e curva LIM B II a traço contínuo)

## **Anexo B**

### **Tabelas de *Inputs* introduzidos no WUFI para as simulações higrotérmicas**





Anexo B - Tabela 1 - - *Inputs* introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos: 6.3.2.2

Component	Assembly/ Monitor Positions	Revestimento cerâmico de diferentes cores (1,5cm) + Pano de alvenaria (15cm) + EPS (4cm) + Pano de alvenaria (11cm) + Reboco interior (1,5cm)		
	Orientation /Inclination /Height	Orientation	Norte / Este / Sul	
		Inclination	90°	
		Building height / Driving Rain Coefficient	Tall Building, , lower part, up to 10 / R1=0 ; R2=0,05	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior surface	Heat Resistance[m²K/W] / Sd-Value[m]	Rse=0,0588 m²K/W / Sd= -
			SWRA / LWRE / RWAF	0,3; 0,6; 0,9 / 0,9 / 0,7
		Interior surface	Heat Resistance[m²K/W] / Sd-Value[m]	Rsi=0,125 m²K/W / Sd= -
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component	Constant across Component ; Initial Relative Humidity =0,8	
		Initial Temperature in Component	Constant across Component ; Initial Temperature = 20°C	
Control	Calculation Period	01/01/01 – 31 /12 / 01		
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Sim
			Moisture Transport Calculation	Não
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
Climate	Outdoor	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor	EN15026	Normal Moisture Load	
SWRA – short-Wave Radiation Absorptivity/ LWRE – Long-Wave Radiation Emissivity / RWAF – Rain Water Absorption Factor				

Anexo B - Tabela 2 - *Inputs* introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos:  
6.2.3

Component	Assembly/ Monitor Positions	Reboco exterior (1,5cm) + Pano de alvenaria cerâmica (22cm) + Reboco interior (1cm)		
	Orientation /Inclination /Height	Orientation	Este	
		Inclination	90°	
		Building height / Driving Rain Coefficient	Tall Building, lower part, up to 10 / R1=0 ; R2=0,05	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rse=0,0588 m <sup>2</sup> K/W/ Sd= -
			SWRA / LWRE / RWAF	0,4 / 0,9 / 0,7
		Interior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rsi=0,125 m <sup>2</sup> K/W / Sd= -
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component	Constant across Component ; Initial Relative Humidity =0,8	
		Initial Temperature in Component	Constant across Component ; Initial Temperature = 20°C	
Control	Calculation Period	01/01/01 – 31 /12 / 02		
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Sim
			Moisture Transport Calculation	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
Climate	Outdoor	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor	EN13788	Temperature = 20°C / Relative Humidity = Humidity Class 3	
SWRA – short-Wave Radiation Absorptivity/ LWRE – Long-Wave Radiation Emissivity / RWAF – Rain Water Absorption Factor				

Anexo B - Tabela 3 - *Inputs* introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos:  
6.2.4.2

Component	Assembly/ Monitor Positions	Reboco exterior (1,5cm) + Pano de alvenaria cerâmica (15cm) + XPS (4cm) + Pano de alvenaria cerâmica (11cm) + Reboco interior (1cm)		
	Orientation /Inclination /Height	Orientation	Este	
		Inclination	90°	
		Building height / Driving Rain Coefficient	Tall Building, lower part, up to 10 / R1=0 ; R2=0,05	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rse=0,0588 m <sup>2</sup> K/W Sd= -
			SWRA / LWRE / RWAF	0,4 / 0,9 / 0,7
		Interior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rsi=0,125 m <sup>2</sup> K/W Sd= -
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component	Constant across Component ; Initial Relative Humidity =0,8	
		Initial Temperature in Component	Constant across Component ; Initial Temperature = 20°C	
Control	Calculation Period	01/01/01 – 31 /12 / 01		
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Sim
			Moisture Transport Calculation	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
Climate	Outdoor	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor	Sine Curves	Temperature: Mean Value=10/15/20°C Relative Humidity= 60/70/80%, Amplitude=5%	
SWRA – short-Wave Radiation Absorptivity/ LWRE – Long-Wave Radiation Emissivity / RWAF – Rain Water Absorption Factor				

Anexo B - Tabela 4- *Inputs* introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos: 6.2.4.3 e 6.3.2.1

Component	Assembly/ Monitor Positions	Parede <i>Sandwich</i> = Reboco exterior (1,5cm) + Pano de alvenaria cerâmica (15cm) + XPS (4cm) + Pano de alvenaria cerâmica (11cm) + Reboco interior (1cm) / Parede ETICS = EPS (4cm) + Pano de alvenaria cerâmica (22cm) + Reboco interior (1cm)		
	Orientation /Inclination /Height	Orientation	Este	
		Inclination	90°	
		Building height / Driving Rain Coefficient	Tall Building, lower part, up to 10 / R1=0 ; R2=0,05	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rse = 0,0588 m <sup>2</sup> K/W Sd= -
			SWRA / LWRE / RWAF	0,4 / 0,9 / 0,7
		Interior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rsi=0,125 m <sup>2</sup> K/W Sd= -
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component	Constant across Component ; Initial Relative Humidity =0,8	
		Initial Temperature in Component	Constant across Component ; Initial Temperature = 20°C	
Control	Calculation Period	01/01/01 – 31 /12 / 01		
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Sim
			Moisture Transport Calculation	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
Climate	Outdoor	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor	EN15026	Normal Moisture Load	
SWRA – short-Wave Radiation Absorptivity/ LWRE – Long-Wave Radiation Emissivity / RWAF – Rain Water Absorption Factor				

Anexo B - Tabela 5 - *Inputs* introduzidos no WUFI para as simulações analisadas nos capítulos: 6.3.3.2 / 6.3.3.3

Component	Assembly / Monitor Positions	Solução padrão: Reboco exterior delgado de ligantes sintéticos (0,5cm) + EPS (4cm) + Pano de alvenaria (22cm) + Reboco interior de ligantes minerais (1cm);		
	Orientation/Inclination/Height	Orientation	Sudoeste (SW)	
		Inclination	90°	
		Building height / Driving Rain Coefficient	Tall Building, lower part, up to 10m / R1=0 ; R2=0,05	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rse=0,0588 m <sup>2</sup> K/W/ Sd= 0m
			SWRA / LWRE / RWAF	0,4 / 0,9 / 0,7
		Interior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rsi=0,125 m <sup>2</sup> K/W / Sd=0 m
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component	Constant across Component ; Initial Relative Humidity =0,8	
		Initial Temperature in Component	Constant across Component ; Initial Temperature = 20°C	
Control	Calculation Period	01/01/01 – 31 /12 / 02		
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Sim
			Moisture Transport Calculation	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
Climate	Outdoor	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor	EN13788	T <sub>int</sub> = 20°C / Humidity Class 3	
SWRA – short-Wave Radiation Absorptivity/ LWRE – Long-Wave Radiation Emissivity / RWAF – Rain Water Absorption Factor				

Anexo B - Tabela 6 - *Inputs* introduzidos no WUFI para as simulações analisadas no capítulo:  
7.2.2

Component	Assembly/ Monitor Positions	Solução padrão: Reboco Exterior de ligantes hidráulicos (1,5cm) + Pano de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado (22cm) + Reboco interior de ligantes hidráulicos (1cm);		
	Orientation /Inclination /Height	Orientation	Sudoeste (SW)	
		Inclination	90°	
		Building height / Driving Rain Coefficient	Tall Building, upper part, more than 20m / R1=0 R2=0,2	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rse=0,0588 m <sup>2</sup> K/W/ Sd= variável
			SWRA / LWRE / RWAF	0,4 / 0,9 / 0,7
		Interior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rsi=0,125 m <sup>2</sup> K/W / Sd= -
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component	In each layer; Reboco ext – 100kg/m <sup>3</sup> / Alvenaria = 70kg/m <sup>3</sup> / Reboco int – 100 kg/m <sup>3</sup>	
		Initial Temperature in Component	Constant across Component ; Initial Temperature = 20°C	
Control	Calculation Period	01/01/01 – 31 /12 /04		
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Sim
			Moisture Transport Calculation	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
Climate	Outdoor	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor	EN15026	Normal Moisture Load	
SWRA – short-Wave Radiation Absorptivity/ LWRE – Long-Wave Radiation Emissivity / RWAF – Rain Water Absorption Factor				

Anexo B - Tabela 7 - *Inputs* introduzidos no WUFI para as simulações analisadas no capítulo: 7.3.1

Component	Assembly/ Monitor Positions	Solução padrão: Reboco Exterior (1cm) + Pano de alvenaria (22cm) + Reboco interior de ligantes hidráulicos (1cm); EPS (4cm) ou MW (4cm) colocado pelo int./ext.		
	Orientation /Inclination /Height	Orientation	Sudoeste (SW)	
		Inclination	90°	
		Building height / Driving Rain Coefficient	Tall Building, upper part, more than 20m / R1=0 R2=0,2	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rse=0,0588 m <sup>2</sup> K/W/ Sd= -- <sup>37</sup>
			SWRA / LWRE / RWAF	0,4 / 0,9 / 0,7
		Interior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rsi=0,125 m <sup>2</sup> K/W / Sd=0m
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component	Constant across Component ; Initial Relative Humidity =0,8	
		Initial Temperature in Component	Constant across Component ; Initial Temperature = 20°C	
Control	Calculation Period	01/01/01 – 31 /12 / 03		
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Sim
			Moisture Transport Calculation	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
Climate	Outdoor	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor	EN15026	Normal Moisture Load	
SWRA – short-Wave Radiation Absorptivity/ LWRE – Long-Wave Radiation Emissivity / RWAF – Rain Water Absorption Factor				

<sup>37</sup> O valor de Sd-value [m] não foi considerado no menu *Coefficientes de Transferencia de Superfície*, porque já tinha sido considerado nas propriedades do material, no menu: *Component- Elemento Construtivo*.

Anexo B - Tabela 8 - *Inputs* introduzidos no WUFI para as simulações analisadas no capítulo: 7.3.3

Component	Assembly/ Monitor Positions	Solução: Aplicação de hidrófugo na superfície exterior + Reboco Exterior de ligantes hidráulicos (1,5cm) + Pano de alvenaria de tijolo maciço (40cm) + EPS (4cm) + Reboco interior de ligantes hidráulicos (1cm);		
	Orientation /Inclination /Height	Orientation	Sudoeste (SW)	
		Inclination	90°	
		Building height / Driving Rain Coefficient	Tall Building, upper part, more than 20m / R1=0 R2=0,2	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rse=0,0588 m <sup>2</sup> K/W/ Sd= 0,2m
			SWRA / LWRE / RWAF	0,6 / 0,9 <sup>38</sup> / 0 <sup>39</sup>
		Interior surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> K/W] / Sd-Value[m]	Rsi=0,125 m <sup>2</sup> K/W / Sd= -- <sup>40</sup>
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component	In each layer; Reboco ext – 210kg/m <sup>3</sup> / Alvenaria de tijolo maciço = 100kg/m <sup>3</sup> / Reboco int – 210 kg/m <sup>3</sup>	
		Initial Temperature in Component	Constant across Component ; Initial Temperature = 20°C	
Control	Calculation Period	01/01/01 – 31 /12 / 04		
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Sim
			Moisture Transport Calculation	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
Climate	Outdoor	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor	EN15026	Normal Moisture Load	
SWRA – short-Wave Radiation Absorptivity/ LWRE – Long-Wave Radiation Emissivity / RWAF – Rain Water Absorption Factor				

<sup>38</sup> O valor de *short-wave radiation absorptivity* e *long-wave radiation emissivity* inseridos aqui são um reboco envelhecido à base de ligantes hidráulicos.

<sup>39</sup> O valor de *rain water absorption factor* é igual a zero, devido à aplicação do hidrófugo.

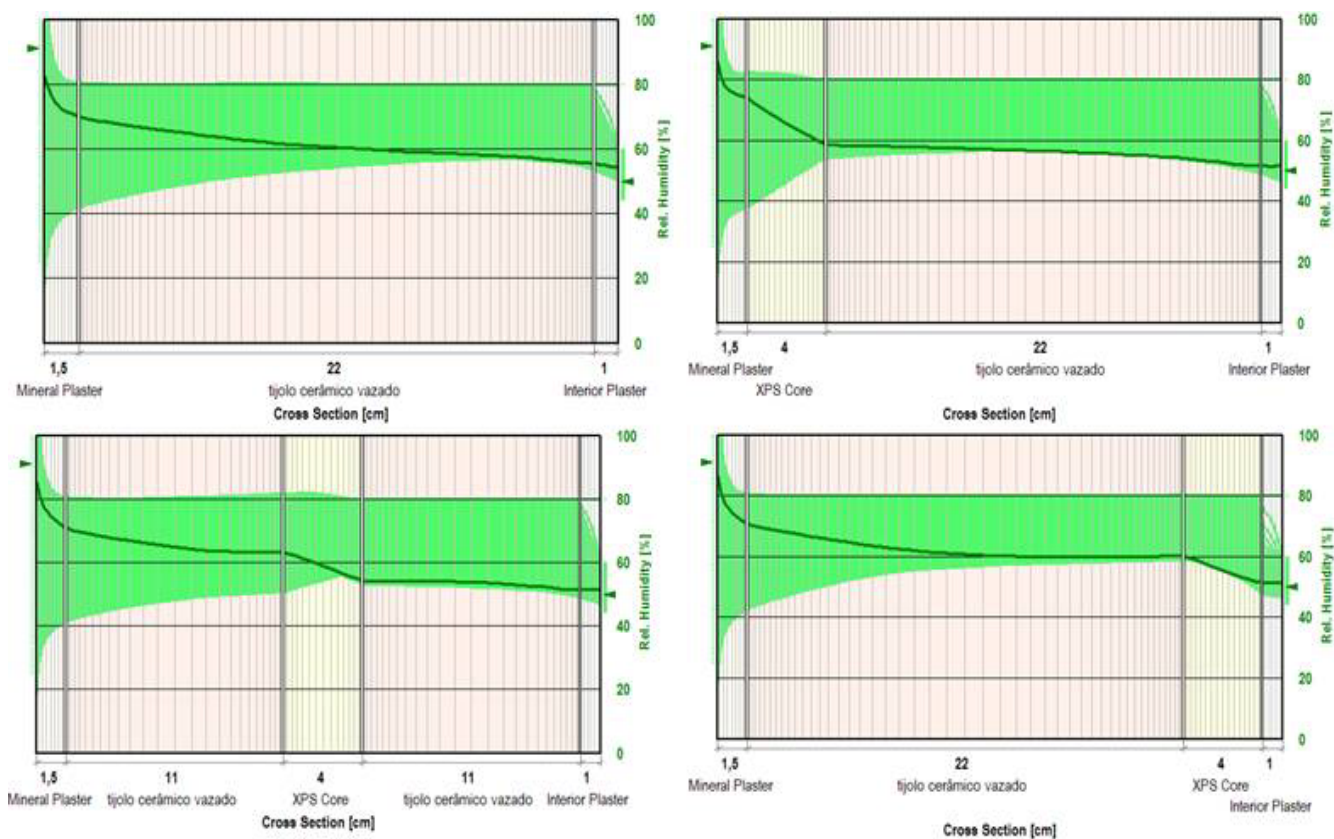
<sup>40</sup> O valor de Sd-value [m] não foi considerado no menu *Surface Transfer Coefficients*, porque já tinha sido considerado nas propriedades do material, no menu: *Component- Assembly*.



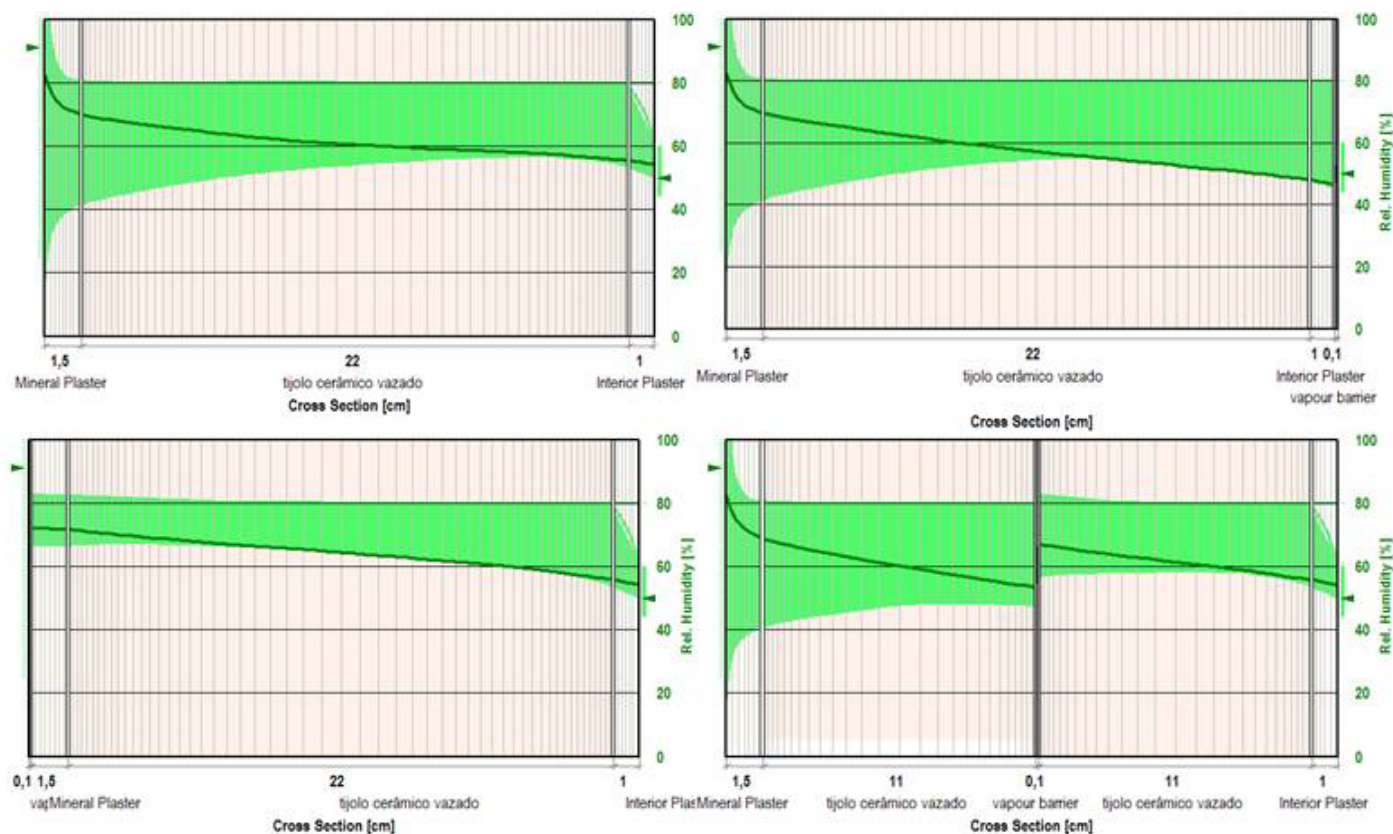
## **Anexo C**

### **Resultados obtidos nas simulações higrotérmicas**

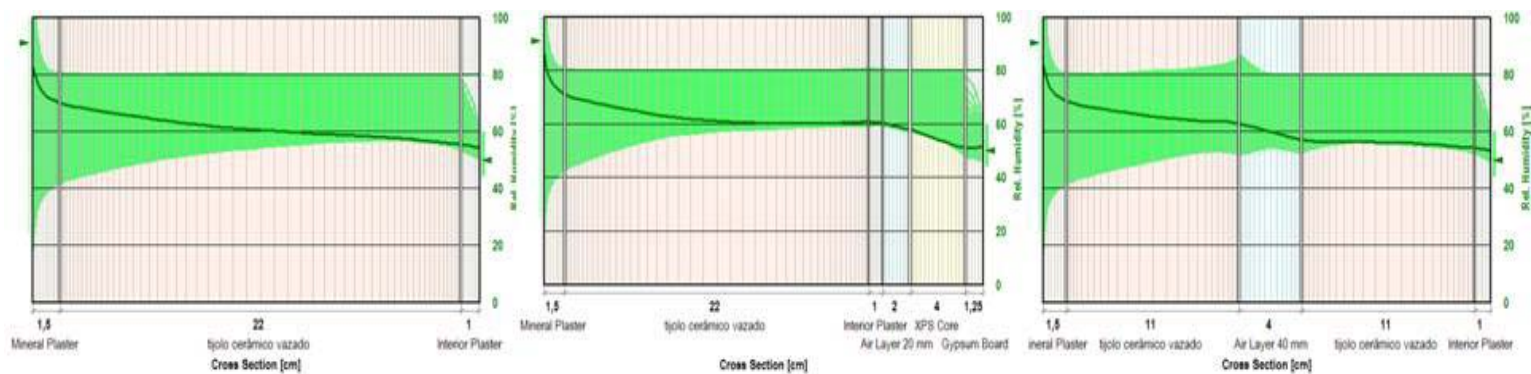




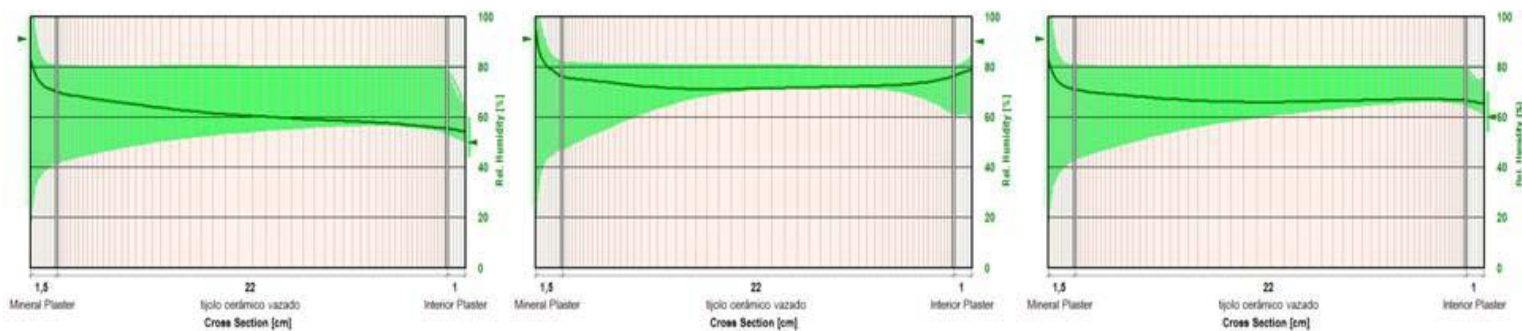
Anexo C – fig. 1 - Caso inicial / Isolamento térmico exterior / Isolamento térmico entre panos de alvenaria / Isolamento térmico interior



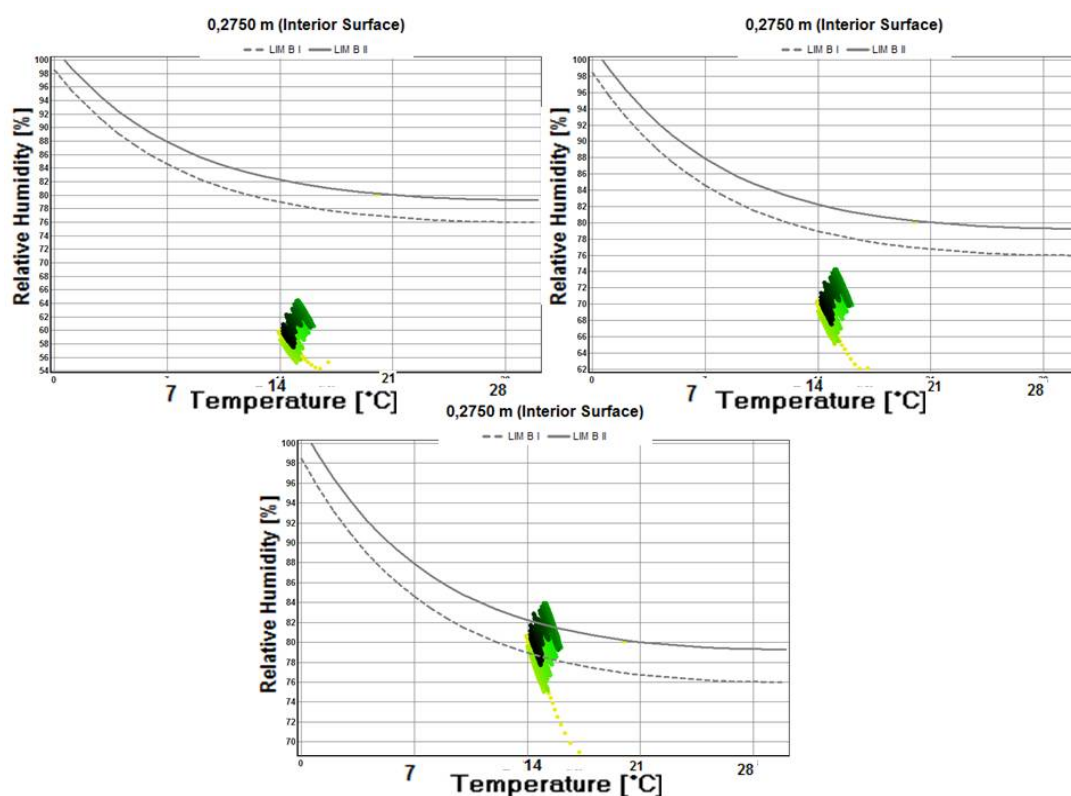
Anexo C – fig. 2 - Caso inicial / Barreira pára-vapor interior / Barreira pára-vapor exterior / Barreira pára-vapor entre panos de alvenaria



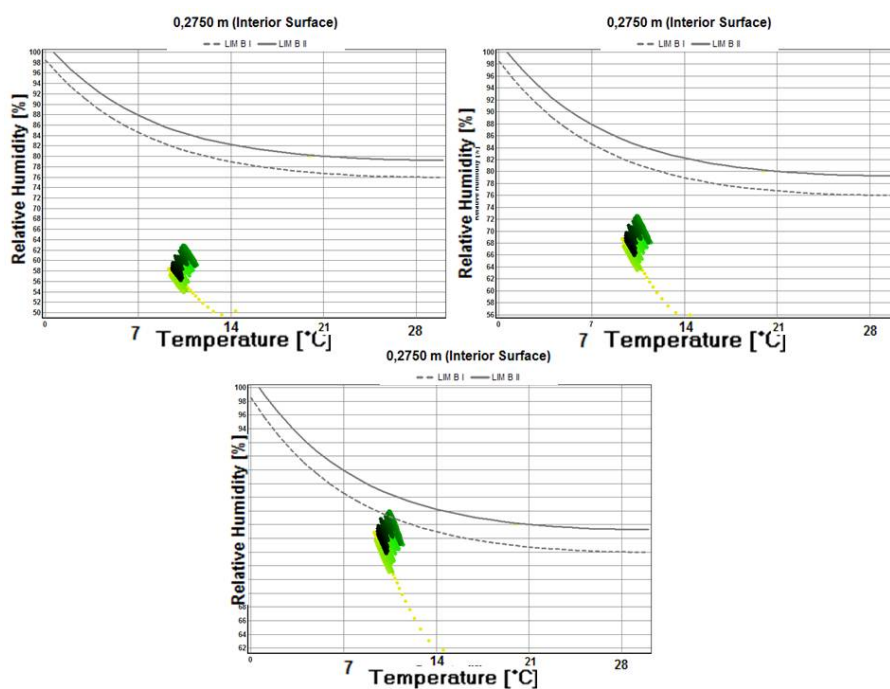
Anexo C – fig. 3 - Caso Inicial / Solução de reabilitação / Caixa-de-ar entre panos de alvenaria



Anexo C – fig. 4 - Caso Inicial / Temperatura interior igual a 10°C / Carga de humidade absoluta interna elevada

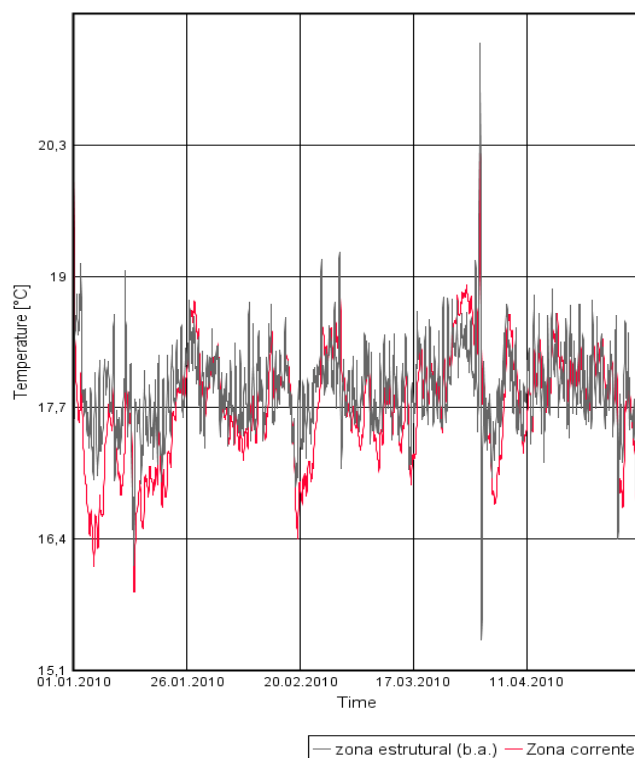


Anexo C – fig. 5 - Avaliação da existência de risco de proliferação de fungos para Temperatura de ambiente interno igual a 15°C e humidades relativas: 60%, 70% e 80%



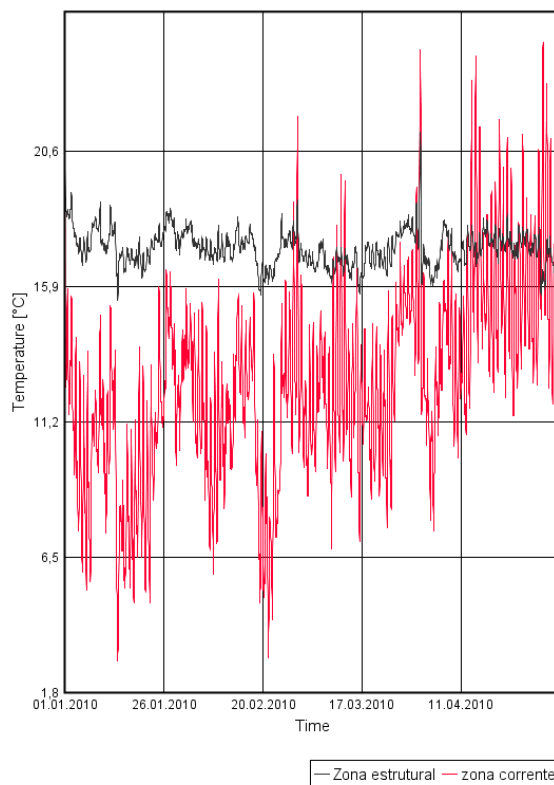
Anexo C - fig 6. - Avaliação da existência de risco de proliferação de fungos para Temperatura de ambiente interno igual a 10°C e humidades relativas: 60%, 70% e 80%

### Temperature



Anexo C – fig. 8 - Temperatura superficial exterior na zona corrente (parede *sandwich*) e zona estrutural (b.a.) com forra cerâmica

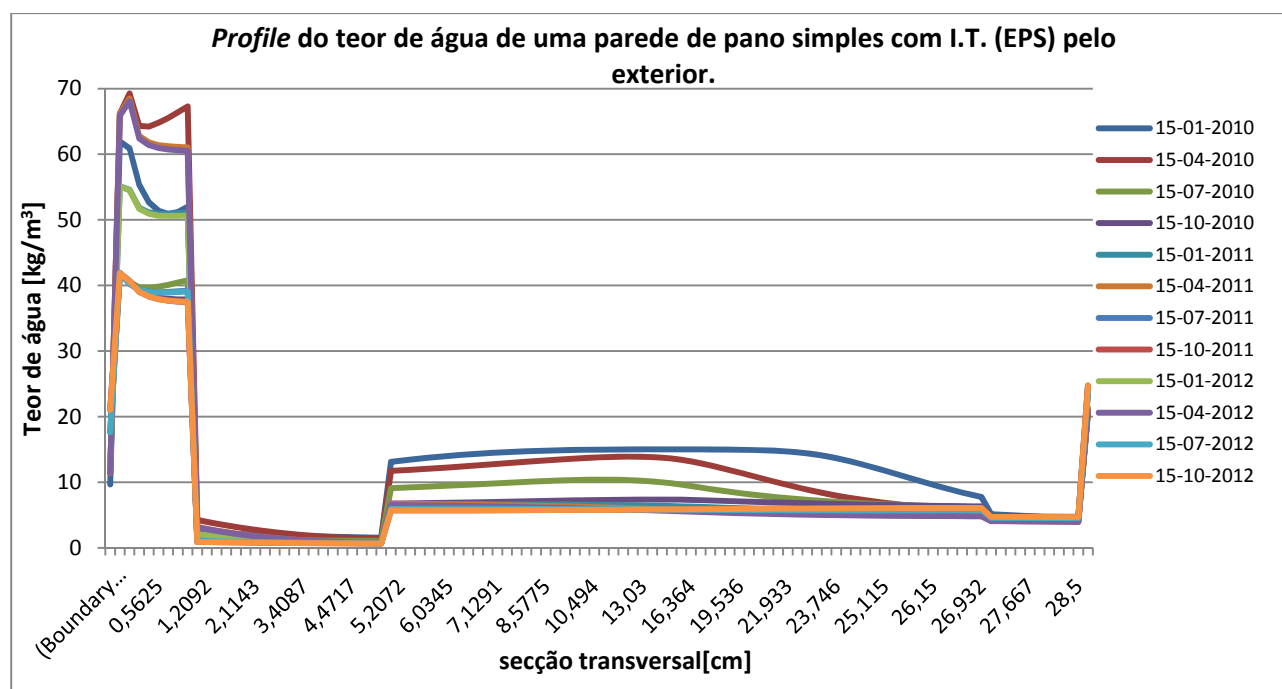
### Temperature



Anexo C – fig. 7 - Temperatura no paramento exterior da parede exterior para a zona corrente e zona estrutural sem forra cerâmica

Anexo C - Tabela 1- Temperaturas da superfície exterior registadas para as simulações estudadas

	Temperaturas da superfície exterior (°C)		Valor mín.	Valor máx.	Dia da ocorrência	Máx. Amplitude Térmica	Dia da ocorrência
Orientação da componente da superfície	SUL	Superfície exterior cor escura	3,0	65,9	04-11-2010	<u>53,6</u>	04-11-2010
		Superfície exterior cor vermelha	2,9	50,2	06-09-2010	37,4	04-11-2010
		Superfície exterior cor branca	2,8	40,2	07-09-2010	21,3	24-10-2010
	Este/Oeste	Superfície exterior cor escura	2,2	61,5	02-08-2010	42,4	02-08-2010
		Superfície exterior cor vermelha	2,2	48,0	02-08-2010	29,0	02-08-2010
		Superfície exterior cor branca	2,2	37,7	28-07-2010	17,5	28-07-2010
	Norte	Superfície exterior cor escura	2,2	43,6	28-07-2010	23,4	28-07-2010
		Superfície exterior cor vermelha	2,2	40,1	28-07-2010	20,0	28-07-2010
		Superfície exterior cor branca	2,1	37,5	28-07-2010	17,6	28-07-2010
		Ambiente exterior	1,2	37,0	28-07-2010	18,8	28-07-2010



Anexo C - Fig 9 - *Profile do teor de água de uma parede de pano simples com isolamento térmico pelo exterior (EPS)*